



基于 LTE-V2X 的车联网资源分配算法

余 翔,陈晓东,王 政,石雪琴

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘 要: 在车联网中的 LTE-V2X 系统中,资源分配包括集中式和分布式 2 种方式,针对分布式方式下 SPS 资源分配算法存在的半双工错误、隐藏终端错误和资源块冲突等问题,提出一种高速公路场景中基于行车方向的改进 SPS 算法。根据高速公路行车方向的特点,将资源池划分为 2 个子资源池,以减少相反方向车辆用户之间的潜在干扰。使每个资源块携带位置信息,从而降低 SPS 算法在资源重选时的碰撞概率。实验结果表明,与传统 SPS 算法相比,该算法可以有效提高分组接收率。

关键词: LTE-V2X 技术;资源分配;资源池;资源碰撞;车联网

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: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.
英文引用格式:YU Xiang, CHEN Xiaodong, WANG Zheng, et al.Resource allocation algorithm for Internet of vehicles based on LTE-V2X[J].Computer Engineering, 2021, 47(2): 188-193.

Resource Allocation Algorithm for Internet of Vehicles Based on LTE-V2X

YU Xiang, CHEN Xiaodong, WANG Zheng, SHI Xueqin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

[Abstract] In the LTE-V2X system of Internet of Vehicles (IoV), there are two ways of resource allocation: centralized mode and distributed mode. To address the problems faced by the Sense-based semi-Persistent Schedule (SPS) resource allocation algorithm for distributed mode, such as half-duplex errors, hidden terminal errors and resource block conflicts, this paper proposes an improved SPS algorithm based on driving direction for freeway scenarios. According to the characteristics of the driving direction on freeway, the resource pool is divided into two sub-pools to reduce the potential interference between the vehicles going in opposite directions. On this basis, each resource block is allowed to carry location information to reduce the collision probability of the SPS algorithm when resources are reselected. Experimental results show that the proposed algorithm can significantly improve the Packet Reception Ratio (PRR) compared with the existing SPS algorithm.

[Key words] LTE-V2X technology; resource allocation; resource pool; resource collision; Internet of Vehicles (IoV)

DOI: 10. 19678/j. issn. 1000-3428. 0056935

0 概述

智能交通系统和自动驾驶被视为 5G 技术中的一个重要部分,其中, V2X (Vehicle to Everything) 系统近年来备受人们的关注,其主要目标是提高道路安全和交通效率^[1-2]。2016 年 9 月, 3GPP (the 3rd Generation Partnership Project) 在第 14 版 (R14) 中首次发布了 LTE-V2X 的版本,该版本支持车辆通信并对 LTE 进行了一些根本性的修改,以满足高移动性的需求^[3]。

3GPP R14 中引入了专门为 V2V 通信而设计的 2 种新的通信模式,即集中式 (Mode 3) 和分布式 (Mode 4)^[4]。在 Mode 3 中,蜂窝网络选择并管理车辆用于其直接 V2V 通信的无线资源,在 Mode 4 中,车辆自主地为其直接 V2V 通信选择无线资源, Mode 4 可以在没有蜂窝覆盖的情况下工作,其也为未来车联网的主要通信模式之一,车辆定期广播协作感知消息 (Cooperative Awareness Messages, CAM), 以告知邻居它们的位置和移动情况^[5-6]。

在 LTE-V2X 环境下,资源分配算法是一个热门

基金项目:国家科技专项计划(2017ZX03001004-004)。

作者简介:余 翔(1964—),男,教授,主研方向为无线通信;陈晓东、王 政、石雪琴,硕士研究生。

收稿日期:2019-12-17 修回日期:2020-02-21 E-mail:chenxd0426@qq.com

的研究课题,该类研究目前分为 Mode 3 和 Mode 4 2类情况。文献[7]在 Mode 3下考虑资源分配问题,当2个重叠的车辆组之间的分配发生冲突或合并公路时,有些车辆不能接收对方的信息,该文设计了具有不同复杂度和性能的算法来解决此类问题。文献[8]提出一种基于位置的资源分配方案,其根据车速、密度、方向和位置来分配不同的频率和时间资源,实验结果表明,该方案能够提高分组接收率(Packet Reception Ratio, PRR)。文献[9]考虑基于车辆位置信息的网络资源管理问题,其引入最小复用距离的概念,在最小复用距离情况下,同一资源可以被不同的发射机使用而不会影响那些处于感知范围内的接收器。文献[10]中的实验结果表明,定位的准确性会影响定位的误差率。对于 Mode 4,文献[11-13]分析和优化 3GPP 标准的 SPS 算法参数。文献[14-16]对 SPS 算法进行修改或扩展,但保留其大部分功能。文献[14]使 VUE(Vehicle User Equipment)更早地执行资源重选操作,以提前通知其他车辆它们将用于后续传输的资源。文献[15]为了达到高可靠和低延迟通信的目标,使 VUE 告知其他车辆将使用相同无线电资源发送的分组数量,使用合作的解决方案来降低传输碰撞概率。文献[16]中 VUE 只为较频繁且较小的分组保留资源,在不保留资源的情况下传输较少但更大的数据包。

本文提出一种针对高速道路场景 V2V 通信方案的两级自主资源分配机制。根据高速道路的通信场景对车辆的行驶方向进行决策并划分资源池,以减少不同方向的车辆同时发送消息时的干扰。为了降低并行方向剩余通道的干扰,提出一种改进的 SPS 算法,通过在占用资源时报告资源的位置来降低 VUE 的资源碰撞概率。

1 系统模型与问题描述

1.1 V2V 通信场景及 LTE-V2X 简介

如图 1 所示,建立一个双向行驶的高速公路场景模型^[17]。假设公路长为 L m,单向车辆密度分别为 d_l 和 d_r ,则该路段车辆总数为 $2L(d_l+d_r)$ 。

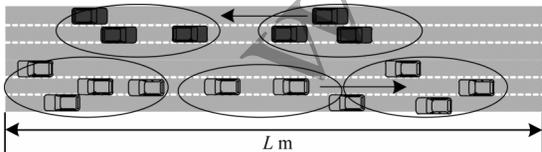


图1 高速公路场景模型

Fig.1 Highway scene model

LTE-V2X 利用单载波频分多址(Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA)并支持 10 MHz 和 20 MHz 的信道,如图 2 所示。信道分为 1 ms 子帧(Sub-Frame, SF)和 180 kHz 资源块

(Resource Blocks, RB)。LTE-V2X 将子信道(Sub-Channel, SC)定义为同一 SF 中的一组 RB,每个 SC 的 RB 数量可以根据分组大小与使用的调制和编码方案(Modulation and Coding Scheme, MCS)而变化。数据通过传输块(Transport Block, TB)传输,并且在旁路控制信息(Sidelink Control Information, SCI)中发送控制信息。每个 TB 包含完整分组(如 CAM),具有必须在同一 SF 中传输并且占用 2 个 RB 的相关联 SCI,该分组可以是信标、CAM 或其他任何事件驱动消息。每个 TB 具有关联的 SCI,且两者都必须在相同的 SF 中发送。SCI 占用 2 个 RB,并且包括用于传输 TB 的 MCS、TB 占用的 RB 以及用于半持久调度的资源预留间隔(Resource Reservation Interval, RRI)的信息,此间隔是指车辆发送其分组而使用的周期(为 100 ms 的倍数),这些信息对于其他节点能够接收和解码传输的 TB 至关重要,因此,必须正确接收 SCI,且 TB 及其相关的 SCI 必须始终在同一个 SF 中传输^[14,18]。

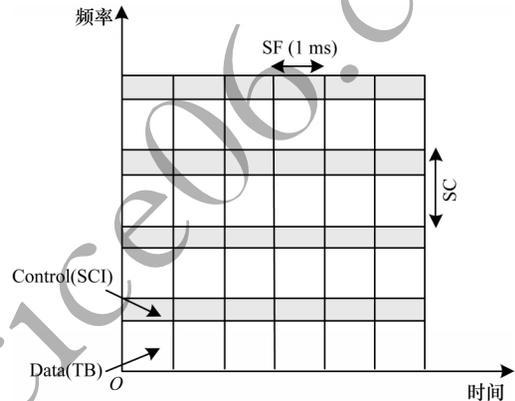


图2 LTE-V2X 的子帧和子信道

Fig.2 Sub-frame and sub-channel of LTE-V2X

1.2 问题描述

1.2.1 Mode 4 下的 VUE 干扰问题

在 Mode 4 下,设计 eNodeB 覆盖范围之外 V2V 操作时的一个基本思路是 VUE 自主选择 V2V 池中的资源以进行数据传输。由于不考虑集中调度,因此每个 VUE 必须独立做出其决定,但这可能导致同时发送 VUE 之间的干扰。在特定接收端,来自 VUE 的接收信号的信号干扰噪声比(Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR)可以表示为:

$$\gamma_i = \frac{P_T G_i}{\sum_{j \in \mu_i} P_T G_j + \sum_{j \in \nu_i} P_T G_j \Gamma_{s_i}^j + N} \quad (1)$$

其中, P_T 表示每个 VUE 的固定发射功率, G_j 是 VUE- i 和 VUE- j 之间的路径增益,包括天线增益、阴影衰落、路径损耗等带来的影响, N 表示噪声功率, μ_i 是在 VUE- j 一定通信范围内产生资源碰撞的 VUE 的集

合, V_i 表示 VUE- i 在相同 SF 不同 RB 间产生带内辐射的 VUE 的集合, $\Gamma_{s_i}^j$ 是 VUE- i 对 VUE- j 造成的带内辐射的增益系数。

式(1)右侧分母中的第 1 个干扰项对应重复使用同频资源(即资源冲突)而引起的同信道干扰。当干扰 VUE 信号的接收功率远大于预定信号的接收功率时, 干扰 VUE 信号可以掩蔽另一个预定信号, 即在一般情况下, 需要避免邻近 VUE 之间的资源冲突。式(1)右侧分母中的第 2 个干扰项是由带内发射问题(IBE)引起的, IBE 是同一 SF 不同 RB 上接收功率相差很大造成的干扰泄露问题。根据文献[19]采用的模型, IBE 的典型电平可能比预期信号功率低 20 dB~30 dB。因此, 当来自不同传输信号的接收功率之间存在很大差异时, 可能在 V2V 中产生明显的干扰。

1.2.2 SPS 算法存在的问题

LTE-V2X 下的 SPS 算法基于感知的每个 RB 的能量大小来列出空闲资源, 每个车辆决定何时需要重新选择资源, 这使得资源在使用中更加受限, 并且至少需要 20% 的空闲资源才能选择合适的可用资源, 以及资源重选的资源块存在位置不确定性, 当 VUE 的数量较多时, 容易发生资源冲突问题。

2 基于行车方向的 SPS 算法

2.1 基于行车方向的资源池划分

由于 CAM 消息是以周期性广播的形式被发送, 因此此时作为发送方的 VUE 一定少于接收消息的 VUE。当行驶在不同方向上的车辆同时作为发送端的可能性大于同时作为接收端, 且两车之间的距离较近时, 会产生邻频或同频干扰, 从而降低了 VUE 的 PRR 并影响了 VUE 的体验感受。

本文提出基于 LTE-V2X 的车联网资源分配算法。在第 1 阶段, 根据车辆的行车方向将资源池分成 2 个子资源池, 子资源池被分配给沿左右方向移动的 VUE, 如图 3 所示。将不同方向的 VUE 划分到不同的资源池上以减少对彼此的干扰。

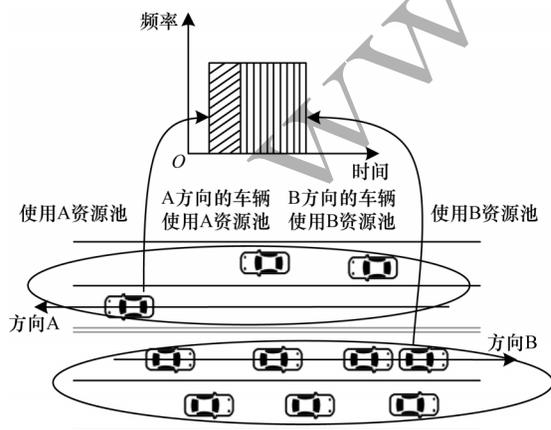


图3 基于行车方向的资源池划分

Fig.3 Division of resource pool based on driving direction

由 VUE 选择的资源池可以描述为:

$$\text{Pool} = \begin{cases} R_A, \text{VUE朝向A} \\ R_B, \text{VUE朝向B} \end{cases} \quad (2)$$

从图 3 可知, 还可以根据不同方向的交通流密度预先配置不同的子资源池大小 ρ_A 和 ρ_B , 该方法可以与其他分布式资源分配机制相结合, 以进一步降低每个子资源池中的干扰。

2.2 SPS 资源分配算法

在 LTE-V2X Mode 4 的 SPS 算法中, 每个车辆根据信道感知结果独立选择传输资源, 并保留所选资源供今后使用。SPS 算法主要分为感知(Sensing)、可用资源选择(Selection)和资源重选(Reselection) 3 个过程。

2.2.1 Sensing 过程

Sensing 过程即通过感知窗口(Sensing Window, SW)中其他 VUE 使用的 RB 情况来确定 SW 中的资源是否可用。在 SW 中, 监测最近的 1 000 个 SF, VUE 不断接收直通链路接收信号强度指示(Sidelink Received Signal Strength Indicator, S-RSSI) 阈值以确定给定 RB 是否正在被使用, 若信号大于该阈值, 则 RB 被认为繁忙。该标准没有指定阈值的具体取值, 但是 3GPP 工作文档^[20]通常通过添加 -107 dBm/RB 来计算该阈值。

根据 Sensing 结果, 将信号小于阈值的 RB 作为可用资源, VUE 创建自己的可用资源列表 S_a , 该列表包括所有可用资源, 但符合如下条件的资源除外: RB 的 S-RSSI 高于一定的阈值, 且资源被其他车辆占用。如果 S_a 的资源少于 20%, 增加 3 dB 参考信号接收功率(Reference Signal Received Power, RSRP), 直到 S_a 的可用资源超过 20%, 否则继续执行上述步骤。

2.2.2 Selection 过程

VUE 在选择窗口中找出最优的 20% 资源, 即在 S_a 中具有最低 S-RSSI 值的 20% 资源, 然后车辆随机选择最优 20% 资源中的传输资源, 此时会产生一个资源计数器 R_c 。下一个资源选择的 R_c 值取决于 CAM 的 RRI, 通常 CAM 的 R_c 取值为 5~10。

2.2.3 Reselection 过程

R_c 的值在每次广播消息后减少 1, 如果 $R_c = 0$, 则需要重新选择分配机制来决定是否保持相同的资源概率 ρ 以维护其资源, 或用概率 $(1-\rho)$ 重新选择资源。SPS 算法描述如下:

算法 1 SPS 算法

输入 RB, P_{rxRB} , k , ρ

输出 BR_{transmit}

1. for all vehicles in the scenario do
2. toss a coin with probability of BR reselection ρ
3. if reselection := true then
4. stop transmitting on currently selected BR

5. for all BR do
6. measure P_{rxBR}
7. end for
8. rank BR by P_{rxBR}
9. select the k best BR candidates
10. if P_{rxBR} on currently select BR $> M \cdot \min(P_{rxBR})$
11. then randomly select a BR among the k best candidates
12. else
13. keep currently selected BR for next transmission
14. end if
15. else
16. transmit without BR reselection
17. end if
18. end for

SPS 算法产生显著数据包冲突^[21]的一个原因是 VUE 所选择的下一个资源位置具有不确定性。事实上,在 SPS 算法中,没有规定 VUE 可以为资源池中的下一个 RB 传递其所选位置的信息,虽然随机选择传播资源是减少冲突所必需的,但是存在随机性成本,其碰撞概率不能被最小化。尽管 Sensing 提供了在 SW 中使用的可能位置的一些信息,但是通过该信息难以确定性地防止碰撞。

2.3 SPS 资源分配算法优化

为了解决 SPS 算法中 Reselection 不确定性所带来的资源选择碰撞问题,本文让每个数据包为下一条数据包携带资源位置信息。因此,需要一个小的扩展用于存储 SCI,大小约为 2 Byte,以在传输时获得更高的可靠性,在需要时宣布下一个资源位置、RC 和冲突位置。上述过程不依赖于感知过程,从而减少了由于资源选择而可能发生的数据包冲突。此外,当 R_c 的值越大时,位置变化越不确定,要求每个 VUE 在 $R_c = 1$ 时提前确定下一个资源块的位置,如图 4 所示,由于这些位置信息在 $R_c = 0$ 之前就已确定,如果选择相同资源的 VUE 即有机会改变所选的 RB 并公布新调整的位置。如图 5 所示,在开始时刻, VUE₁ 和 VUE₂ 因选择同一资源块而产生冲突,在携带位置信息后, VUE₂ 在 $R_c = 0$ 时已经知道 VUE₁ 所要占用的资源块,因此, VUE₂ 移动到不同的资源位置,从而避免发生资源块冲突问题。

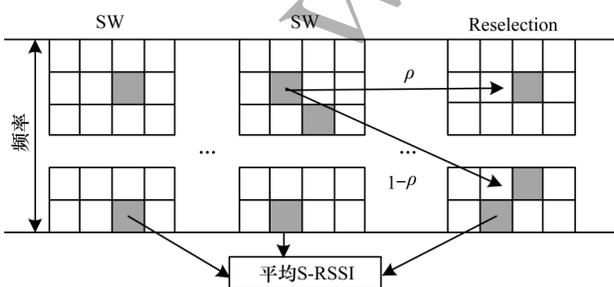


图 4 SPS 算法的资源重选过程
Fig.4 Resource reselection process of SPS algorithm

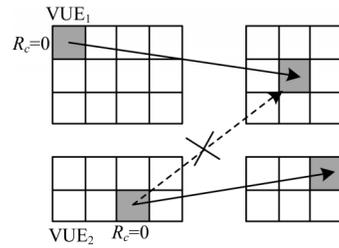


图 5 携带位置信息的 Reselection 示意图
Fig.5 Schematic diagram of Reselection with location information

在 Sensing 过程中,每次感知的复杂度都为常数级别, $T_1(n) = O(c)$, 其中, c 为常数; 在 Selection 过程中,需要对每一个资源块进行遍历,即时间复杂度为线性, $T_2(n) = O(n)$; Reselection 过程的时间复杂度也是常数级别,即 $T_3(n) = O(c)$ 。总的时间复杂度为 $T(n) = T_1(n) + T_2(n) + T_3(n) = O(c) + O(n) + O(c)$, 使用大 $O(n)$ 计数法将总时间复杂度表示为 $T(n) = O(n)$ 。总的空间复杂度为 $S(n) = O(n)$ 。

3 仿真结果与分析

将本文算法与随机资源分配算法、SPS 资源分配算法进行实验对比,表 1 所示为主要仿真参数设置。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters setting	
参数	设置
系统带宽/MHz	10
场景	高速公路
数据包大小/Byte	190 或 300
信号接收范围/m	0~500
传播模型	WINNER+
最大发射功率/dBm	23
路径损耗/dB	47.86
VUE 天线增益/dBi	3
VUE 天线高度/m	1.5

本文算法使得每辆车定期向其所有邻居广播一个固定大小的信标,目的是通知它们该车辆的存在。这种应用与公共安全密切相关,因此,需要可靠、低延迟的无线通信。在实验评价方面,本文采用以下性能指标^[17]:

1) PRR, 定义为一定时间内所有发送的数据包中成功接收的数据包数量和全部数据包数量的比值,计算公式如下:

$$PRR = \frac{N_{\text{success}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, N_{success} 是成功接收到的消息总数, N_{total} 是在原始车辆通信范围内的消息总数。

2) 碰撞率(Collision Ratio, CR), 为通信范围内碰撞链路数与链路总数的比值, 计算公式如下:

$$CR = \frac{L_{\text{collision}}}{L_{\text{total}}} \quad (4)$$

其中, $L_{\text{collision}}$ 表示通信范围内的碰撞链接数, L_{total} 是模拟中的链路总数。

3) 累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)曲线。

在消息大小分别为 190 Byte 和 300 Byte 时 3 种算法的 PRR 对比结果如图 6、图 7 所示。从图 6、图 7 可以看出, 随着传输距离的增加, PRR 降低, 路径损耗和干扰增大, 且随机资源分配算法的性能始终最差, 这是因为其每次均随机选择分配, 很容易产生资源碰撞, 导致 PRR 最低。本文算法在 250 m 距离内发送 190 Byte 的 PRR 保持在 90% 以上, 发送 300 Byte 的 PRR 也保持在 80% 以上, 因此, 该算法能够满足实际需求。

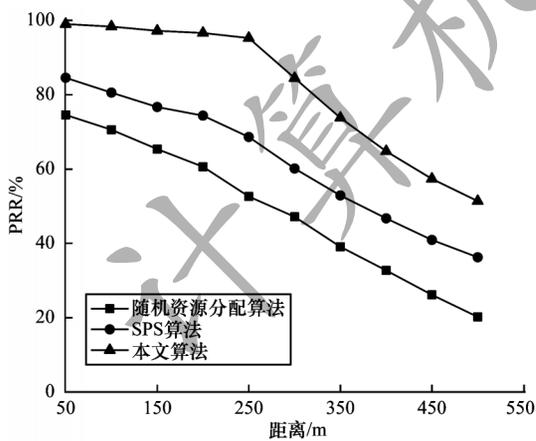


图 6 消息大小为 190 Byte 时 3 种算法的 PRR 对比
Fig.6 PRR comparison of three algorithms when message size is 190 Byte

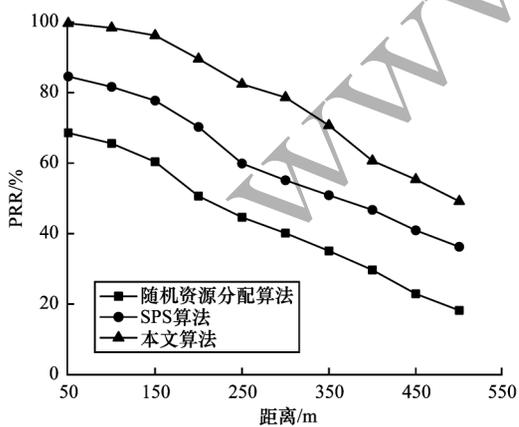


图 7 消息大小为 300 Byte 时 3 种算法的 PRR 对比
Fig.7 PRR comparison of three algorithms when message size is 300 Byte

图 8 所示为 3 种算法的 CR 对比结果, 从图 8 可以看出, 随机资源分配算法的 CR 最高, 这是因为其资源块的选择随机性较大, 容易发生冲突, 本文算法 CR 最低, 其碰撞率显著降低且性能更加稳定。

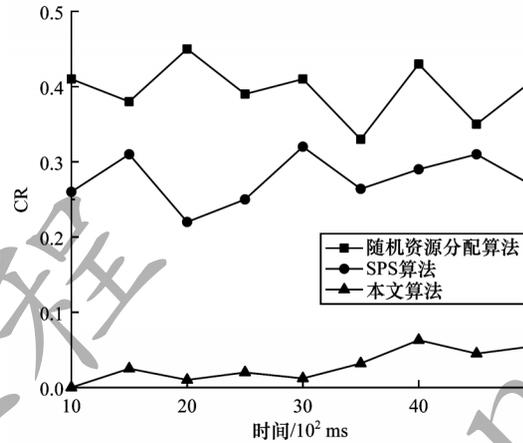


图 8 3 种算法的 CR 对比
Fig.8 CR comparison of three algorithms

图 9 所示为 3 种算法的 CDF 曲线对比结果。从图 9 可以看出, 对于随机资源分配算法, 约有 21% 的 VUE 的 PRR 大于 80%, 而本文算法约有 75% 的 VUE 的 PRR 大于 80%, 即该算法的性能优于 2 种对比算法。

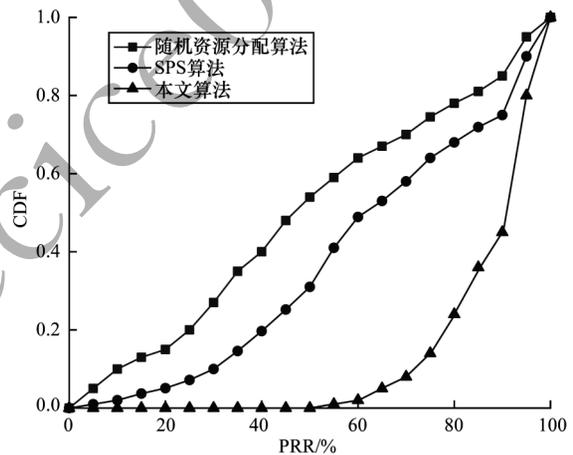


图 9 3 种算法的 CDF 对比
Fig.9 CDF comparison of three algorithms

4 结束语

本文对 SPS 资源分配算法进行改进, 提出一种基于 LTE-V2X 的车联网资源分配算法。对不同方向的车辆进行资源池划分, 以降低 VUE 之间的干扰, 在资源重选时, 采用在占用资源时报告资源位置的方式来减少 VUE 资源碰撞的概率, 从而提高 PRR 并减少资源冲突的发生。仿真结果表明, 相对传统 SPS 算法, 该算法的 PRR 值较高, CR 值较低。本文分析的是分布式资源分配方式, 下一步将联合集中式资源分配方式以进行混合资源分配算法研究。

参考文献

- [1] CHEN Shanzhi, HU Jinling, SHI Yan, et al. Technologies, standards and applications of LTE-V2X for vehicular networks[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(4): 1-11. (in Chinese)
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.
- [2] CAICT. White paper of Internet of vehicles [EB/OL]. [2019-11-10]. https://www.sohu.com/a/195512483_654086. (in Chinese)
中国信息通信研究院. 车联网白皮书[EB/OL]. [2019-11-10]. https://www.sohu.com/a/195512483_654086.
- [3] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN) [EB/OL]. [2019-11-10]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/08_09_00_60/ts_136300v080900p.pdf.
- [4] ABANTO-LEON L F, KOPPELAAR A, DE GROOT S H. Enhanced C-V2X mode-4 subchannel selection [C]// *Proceedings of 2018 IEEE Vehicular Technology Conference*. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2018: 1-5.
- [5] 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.
- [6] SUN W L, STROM E G, BRANNSTROM F, et al. Radio resource management for D2D-based V2V communication [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6636-6650.
- [7] ABANTO-LEON L F, KOPPELAAR A, DE GROOT S H. Parallel and successive resource allocation for V2V communications in overlapping clusters [C]// *Proceedings of 2017 IEEE Vehicular Networking Conference*. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2017: 223-230.
- [8] 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.
- [9] CECCHINI G, BAZZI A, MASINI B M, et al. Localization-based resource selection schemes for network-controlled LTE-V2V [C]// *Proceedings of 2017 International Symposium on Wireless Communication Systems*. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2017: 396-401.
- [10] 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.
- [11] NABIL A, KAUR K, DIETRICH C, et al. Performance analysis of sensing-based semi-persistent scheduling in C-V2X networks [C]// *Proceedings of 2018 IEEE Vehicular Technology Conference*. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2018: 1-5.
- [12] MOLINA-MASEGOSA R, GOZALVEZ J, SEPULCRE M. Configuration of the C-V2X mode 4 sidelink PC5 interface for vehicular communication [C]// *Proceedings of 2018 International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks*. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2018: 43-48.
- [13] TOGHI B, SAIFUDDIN M, MAHJOUR H N, et al. Multiple access in cellular V2X: performance analysis in highly congested vehicular networks [C]// *Proceedings of 2018 IEEE Vehicular Networking Conference*. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2018: 1-8.
- [14] 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): 4388-4395.
- [15] BONJORN N, FOUKALAS F, CANELLAS F, et al. Cooperative resource allocation and scheduling for 5G eV2X services [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 58212-58220.
- [16] 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.
- [17] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project: technical specification group radio access network; study on LTE-based V2X services; 3GPP TR 36. 885 [EB/OL]. [2019-11-10]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.885/.
- [18] MOLINA-MASEGOSA R, GOZALVEZ J. System level evaluation of LTE-V2V mode 4 communications and its distributed scheduling [C]// *Proceedings of 2017 IEEE Vehicular Technology Conference*. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2017: 1-5.
- [19] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project: technical specification group radio access network; study on LTE device proximity services; radio aspects; 3GPP TR 36. 843 [EB/OL]. [2019-11-10]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.843/.
- [20] Qualcomm Incorporated. Congestion control for V2V: presented at the 3GPP TSG RAN WG1 meeting 87; 3GPP R1-1611594 [EB/OL]. [2019-11-10]. https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_87/Docs/.
- [21] SEPULCRE M, GOZALVEZ J, COLL-PERALES B. Why 6 mbps is not (always) the optimum data rate for beaconing in vehicular networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2017, 16(12): 3568-3579.