

文章编号:1007-5321(2017)05-0092-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-039

基于 D2D 通信的 V2X 资源分配方案

张海波, 向煜, 刘开健, 陈善学

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对基于设备到设备(D2D)的汽车间通信复用蜂窝资源带来的干扰问题,考虑在满足车辆用户(V-UEs)的通信要求下,通过一个启发式算法最大化蜂窝用户(C-UEs)总的吞吐量. 首先通过图着色原理将没有干扰的车辆分在同一簇;其次根据分簇结果,利用改进的匈牙利指派算法为V-UEs分配信道;最后通过调整功率最大化C-UEs总的吞吐量. 仿真结果表明,此算法能够很好地解决车通信(V2X)的同层干扰和跨层干扰问题,在保证V-UEs通信可靠性的前提下,提高了频谱利用率.

关键词: 车通信; 设备到设备; 资源分配; 图着色; 指派算法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

V2X Resource Allocation Scheme Based on D2D Communication

ZHANG Hai-bo, XIANG Yu, LIU Kai-jian, CHEN Shan-xue

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Large amount of interference, due to share the cellular network resources, exists in device-to-device (D2D) based vehicular communication system with heavy load. A heuristic algorithm is proposed to maximize the total throughput of cellular-users (C-UEs) while meeting the minimum security communication requirements of vehicular-users (V-UEs) at the same time. Firstly, the vehicles without interference are divided into the same cluster by principle of graph coloring. Secondly, according to the clustering results, the improved Hungarian assignment algorithm is used to allocate the channel. Finally, the power is adjusted to maximize total throughput of C-UEs. Simulations show that the proposed algorithm can effectively solve the vehicle-to-everything (V2X) co-layer and cross-layer interference problem, and improve the spectrum utilization so as to ensure the reliability of V-UEs communication.

Key words: vehicle-to-everything; device-to-device; resource allocation; graph coloring; assignment algorithm

在信息社会时代,汽车是极为重要的移动信息载体.为了解决车辆的辅助驾驶、车载娱乐等多场景业务需求,汽车需要与外界实现交互,这个互联和数据传输过程通常称为车通信(V2X, vehicle-to-eve-

rything)^[1-2].对于V2X的服务需求,因为具有本地性质,并且其通信需求量大,所以传统的蜂窝网络不能满足其要求^[3].设备到设备(D2D, device-to-device)通信不仅拥有局部通信性质,而且可以缓解目

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601071,61301122);长江学者和创新团队发展计划基金项目(IRT16R72);重庆市教委科学技术研究项目(KJ16004012)

作者简介: 张海波(1979—),男,副教授, E-mail: zhanghb@cqupt.edu.cn.

前频谱资源匮乏的问题^[4-5]. Vinel^[6]根据 V2X 和 D2D 的特点,论证了把 D2D 通信应用于 V2X 的可行性. 将 D2D 通信应用在 V2X 中,可以满足 V2X 通信高可靠性低时延的要求,但资源复用的同时也带来干扰.

对于传统 D2D 通信的无线资源管理,Zhang 等^[7]、Fodor 等^[8]和 Huang 等^[9]已经进行了研究,但绩效目标通常仅仅是最大总速率或优先考虑蜂窝链路. 由于汽车间通信的要求和场景不同,传统的 D2D 资源分配优化方案是不能直接应用到 V2X 通信中的,因此基于 D2D 的 V2X 资源分配优化是一个急需解决的问题.

针对 V2X 通信,Luoto 等^[10]分析了 V2X 相关技术上的瓶颈,通过广泛的系统级仿真进行性能评估,结果表明,特别是在高网络负载的情况下,为了实现所需的高可靠性要求,新的资源分配方案和干扰抑制技术是必要的. Bostov 等^[11]、Ren 等^[12]针对 V2X 中的 D2D 通信,提出了一种与车辆位置信息相关的启发式资源分配机制. Xing 等^[13]提出了 2 种不同的算法有效地解决了基于 D2D 技术的 V2X 资源分配,但优化目标是分组数,并且同组内采用时分多址传输,必然增加通信时延. Sun 等^[14]针对 V2X 通信的上行链路资源共享问题,把随机快衰落的 V2X 通信信道状态映射成信干噪比和复用信道个数之间的关系,并提出了一种自然块(RB, resource block)分配和功率控制方案,满足车辆用户(V-UEs, vehicular users)通信对时延与可靠性要求的同时,最大化蜂窝用户(C-UEs, cellular-users)总速率,但分组方式没有完全排除同频干扰.

高网络负载情况下,针对基于 D2D 的 V2X 小消息负载通信场景下的资源分配方案进行研究,如辅助驾驶(对时延和可靠性要求高). 通过一个启发式算法,利用信道复用和功率调整优化方案减少同层干扰和跨层干扰,既保证 V-UEs 通信质量,又最大化 C-UEs 的吞吐量.

1 系统模型

1.1 系统参数

考虑城市中心单小区满负载的状态下,所有 V-UEs 在请求分配资源时的资源分配方案. 假设该小区有 $\{1, \dots, m, \dots, M\}$ 个 C-UEs, 每个 C-UEs 占用 t 个 RB, 有 $\{1, \dots, k, \dots, K\}$ 个 RB 资源, 有 $\{0, 1, \dots, n, \dots, N\}$ 个 V-UEs; C-UEs 之间信道正交, V-UEs 之

间链路采用 D2D 方式通信,其余链路采用频分双工的蜂窝通信模式, D2D 工作在 underlay 模式下复用蜂窝上行链路资源. V-UEs 为了满足通信要求,可以复用多个 C-UEs 的信道资源;最大化系统的资源利用率,一个 C-UEs 的资源也能被多个 V-UEs 复用. 如图 1 所示,链路 2 和链路 3 复用链路 1 的信道资源,但资源复用也带来大量的同层干扰和跨层干扰问题,即 C-UEs(链路 1)对 V-UEs(链路 2 和链路 3)接收端的干扰, V-UEs(链路 2 和链路 3)发送端对基站的干扰;链路 2 发送端对链路 3 接收端的干扰,链路 3 发送端对链路 2 接收端的干扰.

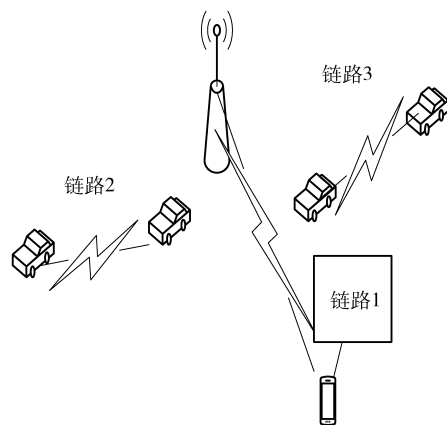


图 1 V2X 通信示意图

1.2 C-UEs 和 V-UEs 的通信要求

针对 V2X 不同的通信场景,其约束要求也不相同. 考虑应用在辅助驾驶领域的情况下,首先要保证车辆间的安全通信,即保证 V-UEs 最小可达速率,然后通过资源优化方案,最大化 C-UEs 的吞吐量.

根据文献[14],如果对 V2X 进行无线资源管理,应该做一个长期的无线资源管理,即在给定的通信速率、中断概率的条件下,车辆间要实现低时延的安全通信, V-UEs 接收端每个信道上的信干噪比和分配的 RB 个数存在一个对应关系.

2 问题规划

由于 V-UEs 安全通信的低时延和可靠性要求,考虑在保证 V-UEs 信干噪比约束下,对基于蜂窝网 D2D 的 V2X 通信中的 V-UEs 和 C-UEs 联合资源优化. 把 C-UEs 的吞吐量作为优化目标,其优化目标函数为

$$\max_{P_{m,k}, P_{n,k}} \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \gamma^k) \quad (1)$$

约束条件为

$$X_{m,n} \in \{0,1\}, \forall n \in N, \forall m \in M \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{m,n} = N', \forall n \in N, \forall m \in M \quad (3)$$

$$0 \leq P_{n,k} \leq P_n^{\max} \quad 0 < P_n < P_n^{\max}, \forall n \in N \quad (4)$$

$$0 \leq P_{m,k} \leq P_m^{\max} \quad 0 \leq P_m \leq P_m^{\max}, \forall m \in M \quad (5)$$

$$\gamma^n \geq \gamma_{th}^n, \forall n \in N \quad \forall m \in M \quad (6)$$

$P_{m,k}$:第 m 个 C-UEs 在第 k 个 RB 上的发射功率.

$P_{n,k}$:第 n 个 V-UEs 在第 k 个 RB 上的发射功率.

$H_{n,k}$:第 n 个 V-UEs 在第 k 个 RB 上的功率增益.

$H_{m,k}$:第 m 个 C-UEs 在第 k 个 RB 上的功率增益.

N' :每个 V-UEs 复用的 RB 个数.

$X_{M,N}$:复用矩阵,其中 $X_{m,n}$ 等于 1 表示第 n 个 V-UEs 复用第 m 个 C-UEs 的 RB.

γ^k :V-UEs 和第 m 个 C-UEs 共用第 k 个 RB 时, C-UEs 在第 k 个 RB 上的信干噪比,即

$$\gamma^k = \frac{P_{m,k} H_{m,k}}{\sigma^2 + \sum_{n=1}^N X_{m,n} P_{n,k} H_{n,k}} \quad (7)$$

γ^n :第 n 个 V-UEs 在 1 个 RB 上的信干噪比.

σ^2 :高斯噪声功率.

γ_{th}^n :V-UEs 满足通信需求,每个 RB 上的信干噪比最小要求.

对于以上约束条件,式(4)和式(5)表示 V-UEs 和 C-UEs 功率限制;式(6)表示第 n 个 V-UEs 在复用无线资源时,为了保证通信质量要求,对信干噪比的约束,其中:

$$\gamma^n = \frac{P_{n,k} H_{n,k}}{\sigma^2 + \sum_{i=1, i \neq n}^N P_{i,k} H_{i,k} + P_{m,k} H_{m,k}} \quad (8)$$

3 分配方案

针对以上的优化目标,提出一个启发式的 3 步算法,在每一步优化的基础上,保证总的优化结果.首先固定 C-UEs 和 V-UEs 的发射功率,将彼此间不存在干扰的 V-UEs 基于图着色原理分簇;然后根据分配好的簇,利用改进的匈牙利指派算法对 V-UEs 进行信道分配,保证 V-UEs 通信可靠性,且最大化频谱的利用率;最后根据已经匹配好的信道复用方

案,调整 C-UEs 和 V-UEs 的发射功率,使其满足 V-UEs 的通信要求,并最大化 C-UEs 的总速率.具体算法流程如图 2 所示.

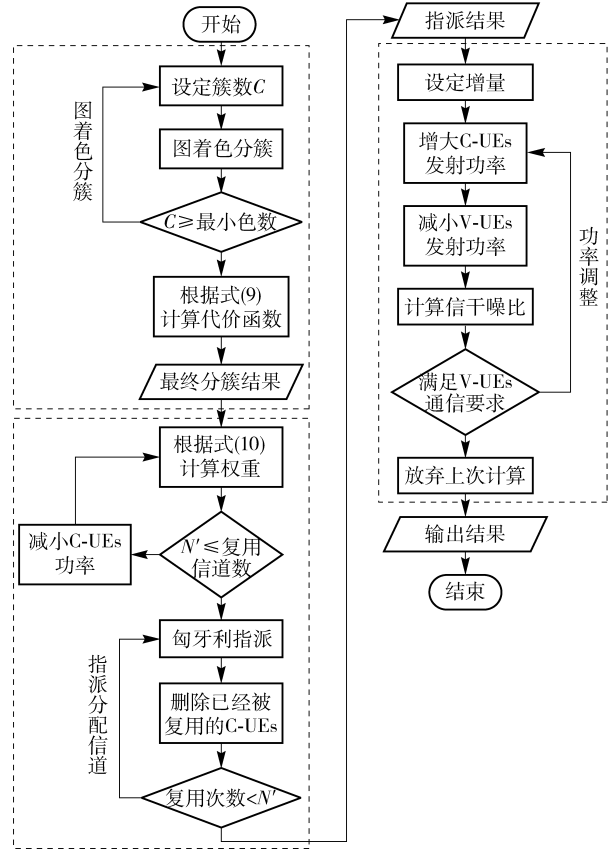


图2 V2X 算法流程

3.1 基于图着色理论的 V-UEs 分簇

从资源利用率角度考虑,特别是大规模网络负载的情况下,分簇可以提高频谱利用效率,从而最大化 C-UEs 的总速率.考虑把彼此无干扰的 V-UEs 分在同一个簇中,复用相同的蜂窝资源,并且尽可能使每簇中成员数基本接近.其基本思想是先以平均功率 $P_{n,k}^{aver}$ (最大功率/分配信道个数, $P_{n,k}^{aver} = P_n^{\max}/N'$) 作为 V-UEs 的发射功率,根据彼此的干扰关系,将无干扰 V-UEs 分在同簇中.利用图着色原理能够很好地解决分簇问题,干扰关系是依据一对 V-UEs 的接收端是否接收到另一对 V-UEs 的发送端的消息来确定的.

根据拓扑图,进行图着色分簇,得到多种初始分簇方案,并确定最小着色数,为了使每簇成员数尽量平均,定义一个新的函数作为评价函数,从多种初始分簇方案中选取评价函数值最小的作为最终的分簇结果.

$$F = \left(\sum_{i=1}^C (|c_i| - \bar{C})^2 \right) / C \tag{9}$$

其中： C 为设定的簇数，簇数 C 大于或等于最小簇数； $\bar{C} = N/C$ ，即每簇平均分的簇成员数； c_i 为每种初始分簇方案中的第 i 个簇； $|c_i|$ 为第 i 个簇中的成员数。

- 算法 1：**
- 1) 根据干扰关系确定干扰矩阵，得到拓扑图。
 - 2) 根据拓扑图确定最小着色数。
 - 3) 设定簇数 C ，保证簇数 C 大于或等于最小簇数。
 - 4) 利用图着色原理分簇，把无干扰的车辆对分在同一簇中，得到多种分簇结果。
 - 5) 对每种分簇，根据式(9)计算评价函数，选择评价函数最小的分簇作为最终的分簇结果。

分簇之后同簇中的 V-UEs 复用相同的 C-UEs 无线资源，但由于地理位置原因，复用相同资源的 V-UEs 也不会产生同频干扰。

3.2 基于匈牙利指派算法的资源分配

先以功率 $P_{m,k}^{aver} = P_m^{max}/t$ 作为 C-UEs 的功率，根据算法 1 已经分配好的 C 个簇，把每个簇当作一个节点，同簇中的 V-UEs 复用相同的蜂窝资源。这里假设为每个 V-UEs 分配 N' 个 RB 资源，即每个 V-UEs 复用 N' 个 C-UEs 的资源，这是一个不规则指派问题，由于每个 V-UEs 分配 N' 个 RB，每个簇需要 N' 次指派。簇和 RB 之间的权重为 $W_{k,c}$ ，根据权重进行最大值指派，每次指派结果即为簇 c 复用的信道，具体算法如下：

$$W_{k,c} = \begin{cases} 0, & \gamma^n \geq \gamma_{th}^n \\ \frac{P_{m,k}^{aver} H_{m,k}}{\sum_C (\sigma^2 + P_{n,k}^{aver} H_{n,k})}, & \text{其他} \end{cases} \tag{10}$$

$$\gamma^n = \frac{P_{n,k}^{aver} H_{n,k}}{\sigma^2 + P_{m,k}^{aver} H_{m,k}} \tag{11}$$

对于 $W_{k,c}$ ，判断簇 c 中的每个 V-UEs 复用第 k 个 RB 信道资源时，每个 V-UEs 的信干噪比是否满足 γ_{th}^n 的约束。如若不满足，簇 c 去复用第 m 个 RB 时的权重为零；如若满足，将整个簇 c 复用第 k 个 RB 时，C-UEs 在此 RB 上的信干噪比作为权重。

- 算法 2：**
- 1) 假如 $|W_{k,c}| \neq 0$ 且 $|W_{k,c}| < N'$ ，即簇 c 可复用 RB 数小于 N' ，降低 C-UEs 的发送功率 $P_{m,k}^{aver}$ ，否则转到 3)。
 - 2) 根据式(10)重新计算权重 $W_{m,c}$ ，转到 1)，直

- 至 $|W_{m,c}| \neq 0$ 且 $|W_{m,c}| > N'$ ，进行下一步。
- 3) 根据权重矩阵，假设虚拟用户，利用匈牙利指派算法，进行最大权重匹配。
 - 4) 根据上一步，删除已经被簇 c 复用的 C-UEs。
 - 5) 利用剩余的 C-UEs 和簇再次建立二分图。
 - 6) 计算簇 c 是否已经分配了 N' 个 RB，如若没有，转到 4)，否则结束匹配。
- 经过以上步骤，特别是步骤 1) 和 2)，能够保证所有的 V-UEs 都可以分配到信道进行正常通信，即保证 V-UEs 通信的可靠性。

3.3 功率调整

根据以上两步，已经进行了信道分配方案，现在通过调整功率，最大化所有 C-UEs 的吞吐量。其主要思想是，在满足 V-UEs 的最低信干噪比要求下，降低 V-UEs 的功率，提高 C-UEs 的功率。

- 算法 3：**
- 1) 设定功率减少值 Δp 。
 - 2) 依次减少 V-UEs 的发射功率 Δp ，并且 C-UEs 增加其发射功率 Δp 。

根据分配好的信道和功率，计算是否满足约束性条件，若满足，转到 2)；不满足，放弃上次操作，结束。

4 仿真结果

3GPP 版本 14 中关于基于 LTE 的 V2X 标准正在商议，目前仅考虑文献[15]中采用的 V2X 测试用例，信道模型主要考虑路径损耗、天线增益、阴影衰落等，具体参数如表 1 所示。为了简化，考虑单小区场景下的 V2X 资源分配。所提算法的性能涉及 C-UEs 的和速率和 V-UEs 正常通信的概率，并和随机分配、改进的匈牙利匹配、文献[14]中所提的资源

表 1 仿真参数

参数	取值
最大发射功率/dBm	24
系统带宽/MHz	10
载波频率/GHz	2
阴影衰落标准差/dB	4
小区半径/m	250
V-UEs 可靠性	0.999 9
V-UEs 广播范围/m	50
V-UEs 数量/辆	10 ~ 100

共享和功率分配算法 (CROWN, cluster-based resource block sharing and power allocation) 进行比较. 改进的匈牙利算法主要思想是, 通过设置虚拟的用户, 建立二分图进行匹配, 权重为 C-UEs 的信道被复用时的信干噪比.

4.1 变量 V-UEs 对系统性能的影响

考虑 V-UEs 数量变化对 C-UEs 和速率与 V-UEs 通信可靠性的影响, 在仿真时, $N' = 1$, 即每个 V-UEs 复用 1 个 RB, 采用得到的最小分簇数作为簇数 C . 图 3(a) 显示了 C-UEs 在不同数量 V-UEs 下的和速率, 总体来看, 随着 V-UEs 数量的增加, C-UEs 的和速率随之降低, 这是因为 V-UEs 的增加, 必然导致跨层干扰增大, 但相比其他算法, 所提算法具有较好的抗干扰特性, 这是由于其采用无干扰分簇, 并且通过匹配选择出最佳的信道复用方案, 尽可能地减少了 V-UEs 对 C-UEs 的干扰.

图 3(b) 描述了随着 V-UEs 数量的增加, V-UEs 正常通信的概率. 由图 3(b) 可以看出, 随机分配信道给 V-UEs, 随着 V-UEs 的增多, 由于信道数有限, 必然会出现 V-UEs 不能正常通信的情况, 所提算法首先通过分簇把没有干扰的 V-UEs 放在一起, 使用相同的信道资源, 提高了信道的利用率, 然后利用匈

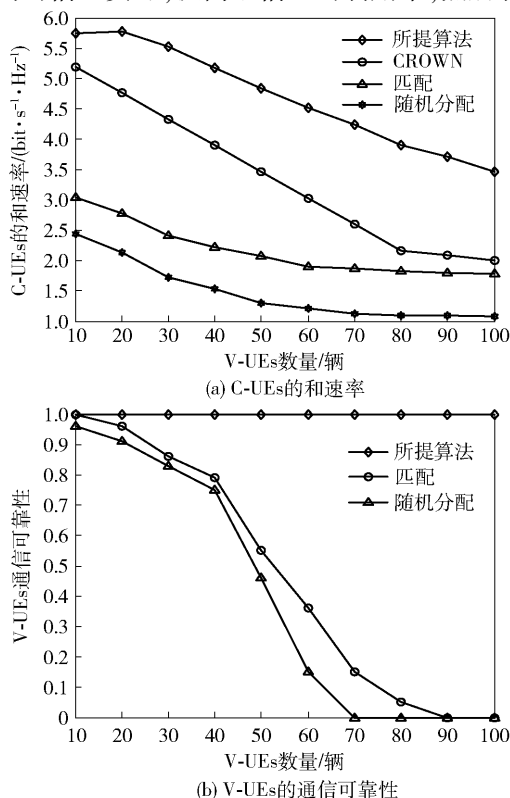


图3 变量 V-UEs 对系统性能的影响

牙利指派算法中的步骤 1)、2) 保证了 V-UEs 通信质量要求.

4.2 变量 N' 对系统性能的影响

考虑每个 V-UEs 复用的信道个数对 C-UEs 和速率与 V-UEs 通信可靠性的影响. 在仿真时, 分簇数 $C = 6$, V-UEs 的数量为 50. 所提算法 1 从全局考虑, 把没有干扰的 V-UEs 分在同一簇复用相同信道资源, 消除了 V-UEs 同频干扰, 通过算法 2 优先复用信干噪比大的 C-UEs 信道资源, 保证 C-UEs 的速率. 图 4(a) 描述了 V-UEs 复用的信道个数对 C-UEs 速率的影响, 可以看出 C-UEs 速率先升后降, 是因为为了保证 V-UEs 的通信可靠性, 分配的信道个数和每个信道上的信干噪比约束 γ_{th}^n 有一定关系, 即信道个数越少, 每个信道上的信干噪比越大. 当每个信干噪比约束 γ_{th}^n 越大时, 为了保证 V-UEs 可以匹配到信道, 必然会降低 C-UEs 的发射功率, 导致起初的 C-UEs 的速率较低.

图 4(b) 描述了不同算法下 V-UEs 通信的可靠性, 验证所提算法通过分簇、指派、功率调整方面足以保证 V-UEs 通信的可靠性. 而随机分配信道方案, 既没有考虑 V-UEs 间的同层干扰问题, 也没有考虑 V-UEs 和 C-UEs 间的干扰. 改进的匈牙利匹配

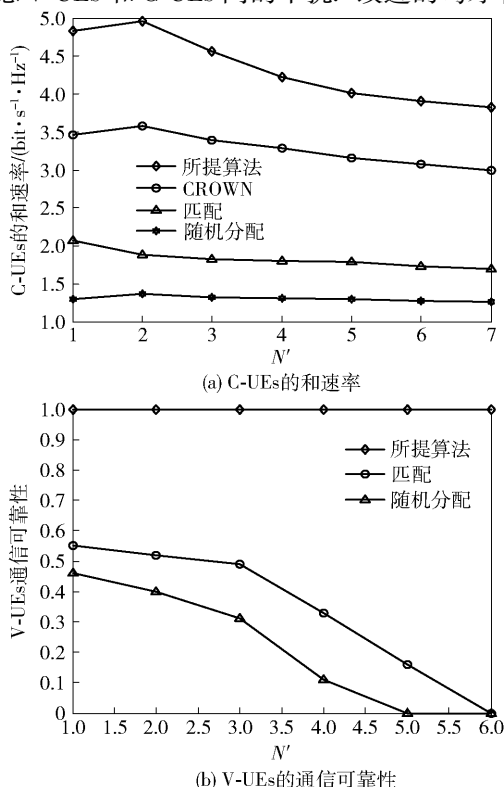


图4 变量 N' 对系统性能的影响

算法只保证了把最合适的信道分给 V-UEs,但不能保证 V-UEs 的正常通信。

5 结束语

讨论了基于 D2D 分簇的 V2X 通信资源分配问题,特别是在大规模网络负载,频谱资源缺乏的情况下,充分保证了 V-UEs 的正常通信,且最大化 C-UEs 的和速率。采用着色算法分簇,提高了频谱利用率,解决了同层干扰问题;匈牙利指派算法和功率调整方案有效地缓解了跨层干扰问题。仿真结果表明在保证 V-UEs 的服务质量下,所提算法不仅能有效提高频谱利用率,还能最大化 C-UEs 的吞吐量。

参考文献:

- [1] 3rd Generation Partnership Project. TS22. 185. V14. 2. 0—2016, Service requirements for V2X services [S]. New Orleans: 3GPPSA#73, 2016: 10-15.
- [2] Chen Shanzhi, Hu Jinling, Shi Yan, 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.
- [3] Sun Wanlu, Strom E G, Brannstrom F, et al. D2D-based V2V communications with latency and reliability constraints[C]//2014 UltraLow Latency and Ultra-High Reliability in-Wireless Communications. IEEE Globecom Workshops. Austin, Tx, USA: IEEE Press, 2015: 754-759.
- [4] Seo H, Lee K D, Yasukawa S, et al. LTE evolution for vehicle-to-everything services[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(6): 22-28.
- [5] Feng Daquan, Lu Lu, Wu Yiyuan, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [6] Vinel A. 3GPP LTE Versus IEEE 802. 11p/WAVE: which technology is able to support cooperative vehicular safety applications [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(2): 125-128.
- [7] Zhang Rongqing, Cheng Xiang, Yang Liuqing, et al. Interference-aware graph based resource sharing for device-to-device communications underlying cellular networks [C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai: IEEE Press, 2013: 140-145.
- [8] Fodor G, Della P D, Belleschi M, et al. A comparative study of power control approaches for device-to-device communications[C]//2013 IEEE International Conference on Communications. Budapest: IEEE Press, 2013: 6008-6013.
- [9] Huang Yifei, Nasir A A, Durrani S, et al. Mode selection, resource allocation, and power control for D2D-enabled two-tier cellular network[J]. IEEE Transactions on communications, 2016, 64(8): 3534-3547.
- [10] Luoto P, Bennis M, Pirinen P, et al. System level performance evaluation of LTE-V2X network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 997-1005.
- [11] Bostov M, Klugel M, Kellerer W, et al. Location dependent resource allocation for mobile device-to-device communications[C]//2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Istanbul: IEEE Press, 2014: 1679-1684.
- [12] Ren Yi, Liu Fuqiang, Liu Zhi, et al. Power control in D2D-based vehicular communication networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5547-5562.
- [13] Xing Weijun, Wang Ning, Wang Chao, et al. Resource allocation schemes for D2D communication used in VANETs[C]//2014 Vehicular Technology Conference. Canada: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [14] Sun Wanlu, Yuan Di, Erik G, et al. Clusterbased radio resource management for D2D-supported safety-critical V2X communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2756-2769.
- [15] 3rd Generation Partnership Project. TR 36. 885. V2. 0. 0—2016, Study on LTE-based V2X services [R]. Busan: 3GPPRAN#72, 2016: 14-22.