基于超图聚簇和干扰限制区域理论的全双工 D2D 车载通信资源管理方案

肖海林^{1,2}, 吴彬², 张中山³, 王承祥^{4,5*}, 周迪⁶

1. 湖北大学计算机与信息工程学院, 武汉 430062

2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004

3. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

4. 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096

5. 网络通信与安全紫金山实验室, 南京 211111

6. 浙江宇视科技有限公司, 杭州 310051

* 通信作者. E-mail: chxwang@seu.edu.cn

收稿日期: 2020-01-06; 接受日期: 2020-03-25; 网络出版日期: 2021-01-05

国家自然科学基金 (批准号: 61872406, 61472094) 和浙江省重点研发计划项目 (批准号: 2018C1059) 资助

摘要 在蜂窝车用无线通信 (cellular vehicular-to-everything, C-V2X) 系统中, 车辆快速移动导致 D2D 链路的网络拓扑不稳定, 频繁重构的网络拓扑增加了同频干扰问题的复杂度和拓扑管理信令的数量, 造成基站的计算能力和带宽资源浪费. 本文建立以簇为核心的全双工 D2D (full-duplex device-to-device, FD-D2D) 车载通信模型, 提出基于超图聚簇 (hypergraph clustering, HG-C) 和干扰限制区域 (interference limited area, ILA) 理论的 FD-D2D 车载通信资源管理方案. 利用链路依赖度 (degree of link dependence, DLD) 和车辆用户 (Vehicle users, VUE) 的计算能力提高簇的生存时间, 降低基站的开销. 同时, 利用动态功率控制和复用区域映射辅助基站分配资源, 削弱复用相同蜂窝链路的 V-D2D (vehicular device-to-device) 链路间和对蜂窝链路的同频干扰, 提高频谱效率. 最后, 基于交通仿真建模软件 VISSIM 产生实时交通流数据, 从而验证本文所提资源管理方案, 结果表明: 基站承担的网络拓扑管理任务量至少降低 50%, 与传统蜂窝 D2D 车载通信相比, 频谱平均复用次数增加 0.5 次以上, 频谱效率增加 10%.

关键词 C-V2X, 超图聚簇, 干扰限制区域, FD-D2D 车载通信, 频谱复用

1 引言

随着蜂窝车用无线通信 (cellular vehicular-to-everything, C-V2X) 技术在汽车行业的快速普及, 对现有蜂窝网络的接入和负载能力, 以及数据传输时延和可靠性提出了严峻考验. 作为未来通信架构中

引用格式: 肖海林, 吴彬, 张中山, 等. 基于超图聚簇和干扰限制区域理论的全双工 D2D 车载通信资源管理方案. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 139–156, doi: 10.1360/SSI-2020-0006

Xiao H L, Wu B, Zhang Z S, et al. Resource management scheme for full-duplex device-to-device vehicular communication using hypergraph clustering and interference limited area theory (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 139–156, doi: 10.1360/SSI-2020-0006

的关键技术之一, D2D (device-to-device) 通信为解决上述问题提供了一个新方向. D2D 通信使用专用频谱资源 (Overlay 模式) 或者复用蜂窝用户 (cellular users, CUE) 的频谱资源 (Underlay 模式) 代替基站实现部分近场通信, 提高网络的接入和负载能力, 满足 C-V2X 对数据传输延时和可靠性的严格要求^[1~4]. 但是城市环境中车辆密集场景较为常见, 专用频谱资源有限, 难以满足车流密集场景下 Overlay 模式 V-D2D (vehicular device-to-device) 通信对频谱资源的需求, 相反 Underlay 模式 V-D2D 通信只需设计合理的同频干扰管理机制, 便可避免频谱资源不足引起信道竞争, 确保 V-D2D 通信的可靠性, 提高频谱效率^[5]. 然而, 车辆快速移动特性, 影响 C-V2X 网络拓扑的稳定性, 导致 V-D2D 链路资源的发现与维护需要消耗掉基站大量的计算能力和带宽资源; 还造成 V-D2D 链路的实时信道状态信息 (channel state information, CSI) 难以获得, 使得利用 CSI 控制发射功率来避免同频干扰的技术方案实现难度加大^[6~10], C-V2X 技术应用受阻.

基于车辆分簇的方法能够改善车载通信网络拓扑的稳定性, 如以链路依赖度 (degree of link dependence, DLD)、演化博弈、轨迹数据预测和 Kmeans 算法为聚簇模型的车辆用户 (vehicle users, VUE) 聚簇均可提高车载通信网络拓扑的稳定性, 降低网络开销^[10~13]. 然而, 上述方案通过基站实现基于多维属性 (车辆间距、车辆行驶方向、车辆的速度和车辆加速度等因素) 的簇划分, 虽然改善了链路频繁重构对基站计算能力和带宽资源的浪费, 但聚簇算法又增加了基站计算能力的消耗. 近年来, 有研究发现超图 (hypergraph, HG) 理论处理多维属性的高阶聚簇问题, 不仅算法的复杂度低, 而且聚簇效率和准确性都得到了提高^[14, 15]. 目前, 这种方法已被用到了文献 [16] 中, HG 理论被用来量化 V-D2D 链路间的干扰关系——干扰超图 (interference hypergraph, IHG), 基站根据 IHG 对 NOMA-V2X (nonorthogonal multiple access V2X) 通信模型中复用相同 CUE 的 V-D2D 链路进行聚簇, 但是该文献并未利用超图理论在解决多维属性聚簇问题的优势对网络拓扑稳定性进行优化. 综合上述文献可知, HG 理论能够通过 VUE 聚簇解决 D2D 车载通信网络的拓扑不稳定性问题, 但是尚未有研究利用聚簇对象的计算能力降低集中式聚簇对控制中心的资源消耗. 此外, HG 理论可以量化链路干扰关系实现强干扰链路间的规避, 但无法对干扰源进行有效控制, 解决同频干扰问题.

干扰限制区域 (interference limited area, ILA) 理论能够削弱 Underlay 模式下 D2D 通信的同频干扰, 降低复用资源分配的难度, 提高频谱复用效率^[17~19]. 文献 [17] 提出利用 ILA 理论限制 D2D 通信对发射端发射功率, 简化复用 CUE 选择的 D2D 通信资源管理方案, 所提方案的 D2D 链路增益要远大于传统 D2D 链路增益, 且对 CUE 信道容量造成的损失可以忽略不计. 文献 [18] 进一步分析证明 ILA 理论在密集的 D2D 链路和高信干扰比情况下覆盖概率和信道容量也要远优于传统方案. 另外, 文献 [19] 提出一种基于 ILA 理论的全双工 (full-duplex, FD) D2D 通信 (FD-D2D) 复用资源管理方案, 采用基于天线隔离的 FD-D2D 通信减少半双工 (half-duplex, HD) 通信产生的频谱资源浪费问题, 提高频谱效率. 根据现有研究可知, 采用基于天线隔离 (天线间隔几十厘米) 及主动消除 (数字消除, 或者模拟消除) 的自干扰消除方案, 可以实现 70 dB 以上的自干扰消除, 使设备吞吐量获得大幅度提升^[20~22]. 上述研究说明基于 ILA 理论的干扰管理和基于天线隔离及主动消除方案可以降低传统 FD-D2D 通信资源管理的实现难度, 提高频谱效率, 但是车载通信网络拓扑不稳定问题不利于该方案在 C-V2X 场景下应用.

本文针对车辆快速移动导致 D2D 通信网络拓扑不稳定、同频干扰管理问题的复杂度增加, 造成基站的计算能力和带宽资源浪费问题, 建立以簇为核心的 FD-D2D 车载通信模型, 提出基于超图聚簇和干扰限制区域理论的 FD-D2D 车载通信资源管理方案, 降低基站计算能力和带宽资源的浪费, 提高频谱效率, 主要贡献可以概括如下.

- (1) 建立以簇为核心的 FD-D2D 车载通信模型, 该模型中簇成员利用 V-D2D 通信将自身探测到

图 1 (网络版彩图) 通信场景

Figure 1 (Color online) Communication scenario

的行驶状态信息 (traveling state information, TSI) 发送给簇头, 簇头将自身探测到的 TSI 和簇成员的 TSI 信息进行融合后, 复用簇内 V-D2D 链路资源组播给簇成员。

(2) 以 DLD 为度量设计超图聚簇 (hypergraph clustering, HG-C) 策略, 该策略利用分布式 VUE 的计算能力协助基站完成超边粗化与簇生成, 仅将关联簇集合 (相关定义在 3.2.1 小节) 的分割交由基站完成。同时, 为简化簇的维护过程, 提出基于道路属性的局部簇维护算法。

(3) 基于 ILA 理论, 仅根据信号功率路径损耗进行动态功率控制, 构造单向直行道路的复用区域映射, 再利用轮询分配模式和簇间频谱复用准则对复用资源进行分配。

本文结构如下: 第 2 节建立 FD-D2D 车载通信模型; 第 3 节设计基于 DLD 的 HG-C 策略, 定义簇间频谱复用准则; 第 4 节基于 ILA 理论实现动态功率控制与复用资源分配; 第 5 节对所提方案进行仿真分析; 第 6 节总结。

2 FD-D2D 车载通信模型

2.1 通信场景

如图 1 所示, 本文针对城市环境中单个基站覆盖的 C-V2X 场景内 K 个正交上行信道集合为 $\mathcal{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_K\}$, N 个 CUE 集合为 $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$, M 辆具备接入蜂窝网络和 FD-D2D 通信能力的 VUE (配备两根独立的收发天线, 实现基于天线隔离与主动干扰消除的自干扰抑制技

图 2 FD-D2D 车载通信资源管理的流程图

Figure 2 Flow chart of FD-D2D vehicle communication resource management

术^[19~22], 后续分析将忽略 FD 通信造成的自干扰) 集合为 $\mathcal{V} = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$. 考虑到城市中车流密集场景较为常见, 为了避免信道竞争对车载安全数据传输的可靠性和低延迟需求产生影响, 本文采用 Underlay 模式的 FD-D2D 通信, $\mathcal{C}'$ 为潜在可复用的 CUE 组成的集合 ($\mathcal{C}' \in \mathcal{C}$). 采用以簇为核心的 FD-D2D 车载通信模型实现 TSI 信息的交互, 通过簇头实现簇成员 TSI 的收集、融合和组播, 减少数据冗余, 提高频谱效率. 本文的研究重点为基于 HG-C 和 ILA 理论的 FD-D2D 车载通信的资源管理, 该资源管理方案的实现流程如图 2 所示.

需要说明的是上述簇内的通信均基于 Underlay 模式的 D2D 通信技术实现, 且允许一对 FD-D2D 链路复用多个 CUE 的信道资源和一个 CUE 的信道资源被多对 FD-D2D 链路复用, 表 1 中给出了簇内资源复用的相关符号定义. 此外, 上述资源复用还需要满足: (1) 同一簇内的 FD-D2D 链路不允许复用同一的 CUE; (2) 不同簇内的 FD-D2D 链路复用同一 CUE 时需要满足簇间频谱复用准则.

2.2 信道模型及通信性能分析

蜂窝上行链路经历独立的块衰落^[3], $\mathcal{C}'$ 集合中的 CUE 远离道路且处于缓慢移动或静止状态^[7], 则 C_n 蜂窝通信链路 $l_{C_n, B}$ ($C_n \in \mathcal{C}'$) 的瞬时信道增益模型为

$$g_{C_n, B} = \beta_{C_n, B} \Gamma_{C_n, B}, \quad C_n \in \mathcal{C}', \quad (1)$$

其中 $\beta_{C_n, B}$ 表示服从指数分布的快衰落增益, $\Gamma_{C_n, B}$ 表示服从对数正态分布的慢衰落增益.

基于 C-V2X 技术的车载通信链路 $l_{V_m, B}$, l_{V_m, C_n} , l_{V_p, V_q} , 遭受的阴影衰落记为 $\beta_{T, R}$ ($\beta_{T, R}$ 服从指数分布, 发射端 $T \in \{\mathcal{C}, \mathcal{V}\}$, 接收端 $R \in \{B, \mathcal{C}, \mathcal{V}\}$). 考虑到 CUE, VUE 和基站天线规格和传输经历的视距成分不同^[7], 定义设备 (CUE, VUE) 到基站的路径损耗因子为 α_0 , CUE 和 VUE 间的路径损耗因

表 1 符号定义
Table 1 Symbol definition

Symbol	Definition
$\mathcal{G} = \{\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_g, \dots, \mathcal{G}_G\}$	The number of clusters is G by vehicle division in this cell
$\mathcal{D}_g = \{\mathcal{D}_1^g, \mathcal{D}_2^g, \dots, \mathcal{D}_d^g, \dots, \mathcal{D}_{N_{C,g}}^g\}$	The number of FD-D2D links is $N_{C,g}$ in the g -th cluster
$\mathcal{D}_d^g = \{V_h^g, V_{m,d}^g\}$	The set of VUE transceivers with d -th FD-D2D link in the g -th cluster
$\mathcal{G}_g = \{V_h^g\} \cup \{V_{m,x}^g x = 1, 2, \dots, N_{C,g}\}$	The set of VUEs in the g -th cluster, V_h^g denotes cluster-head, $V_{m,x}^g$ denotes cluster-member.
$c(V_h^g) = \{V_{m,x}^g x = 1, 2, \dots, N_{C,g}\}$	The set consisting of $N_{C,g}$ cluster-members in the g -th cluster.
$\mathcal{C}_d^g = \{\mathcal{C}_{\mathcal{D}_d^g}^1, \mathcal{C}_{\mathcal{D}_d^g}^2, \dots, \mathcal{C}_{\mathcal{D}_d^g}^{K_d^g}\}, \mathcal{C}_d^g \in \mathcal{C}'$	The set of the K_d^g CUE spectrums of sharing for the d -th FD-D2D link in the g -th cluster.
$\mathcal{C}_g^h = \{\mathcal{C}_1^g, \mathcal{C}_2^g, \dots, \mathcal{C}_{N_{D,g}}^g\}, \mathcal{C}_g^h \in \mathcal{C}'$	The set of CUE spectrums used by cluster-head multicast in the g -th cluster.
$\mathcal{D}_{C_n} = \{\mathcal{D}_1^n, \mathcal{D}_2^n, \dots, \mathcal{D}_{I_n}^n\}, C_n \in \mathcal{C}'$	The set of I_n FD-D2D links reuses the spectrum of C_n .

子为 α_1 , VUE 之间的路径损耗因子为 α_2 . 因此, 通信场景中所涉及的接收端接收到的信号分别为

$$y_B^{C_n} = \sqrt{d_{C_n,B}^{-\alpha_0} P_{C_n,B} g_{C_n,B} s_{C_n}} + \sum_{i=1}^{I_n} \left(\sqrt{d_{V_h^i,B}^{-\alpha_0} P_{V_h^i} g_{V_h^i,B} s_{V_h^i}} + \sqrt{d_{V_{m,x}^i,B}^{-\alpha_0} P_{V_{m,x}^i} g_{V_{m,x}^i,B} s_{V_{m,x}^i}} \right) + n_{C_n}, C_n \in \mathcal{C}', \{V_h^i, V_{m,x}^i\} \in \mathcal{G}_i, \quad (2)$$

$$y_{V_h^i} = \sqrt{d_{V_{m,x}^i,V_h^i}^{-\alpha_2} P_{V_{m,x}^i} g_{V_{m,x}^i,V_h^i} s_{V_{m,x}^i}} + \sqrt{d_{\text{Ant}}^{-\alpha_2} P_{V_h^i} g_{\text{Ant}} s_{V_h^i}} + \sqrt{d_{C_n,V_h^i}^{-\alpha_1} P_{C_n} g_{C_n,V_h^i} s_{C_n}} + \sum_{i,j \in \{1,2,\dots,I_n\}, i \neq j} \left(\sqrt{d_{V_h^j,V_h^i}^{-\alpha_2} P_{V_h^j} g_{V_h^j,V_h^i} s_{V_h^j}} + \sqrt{d_{V_{m,x}^j,V_h^i}^{-\alpha_2} P_{V_{m,x}^j} g_{V_{m,x}^j,V_h^i} s_{V_{m,x}^j}} \right) + n_{V_h^i}, C_n \in \mathcal{C}_i^h, \{V_h^i, V_{m,x}^i\} \in \mathcal{G}_i, \{V_h^j, V_{m,x}^j\} \in \mathcal{G}_j, \quad (3)$$

$$y_{V_{m,x}^i} = \sqrt{d_{V_h^i,V_{m,x}^i}^{-\alpha_2} P_{V_h^i} g_{V_h^i,V_{m,x}^i} s_{V_h^i}} + \sqrt{d_{\text{Ant}}^{-\alpha_2} P_{V_{m,x}^i} g_{\text{Ant}} s_{V_{m,x}^i}} + \sqrt{d_{C_n,V_{m,x}^i}^{-\alpha_1} P_{C_n} g_{C_n,V_{m,x}^i} s_{C_n}} + \sum_{i,j \in \{1,2,\dots,I_n\}, i \neq j} \left(\sqrt{d_{V_h^j,V_{m,x}^i}^{-\alpha_2} P_{V_h^j} g_{V_h^j,V_{m,x}^i} s_{V_h^j}} + \sqrt{d_{V_{m,x}^j,V_{m,x}^i}^{-\alpha_2} P_{V_{m,x}^j} g_{V_{m,x}^j,V_{m,x}^i} s_{V_{m,x}^j}} \right) + n_{V_{m,x}^i}, C_n \in \mathcal{C}_x^i, x \in \{1, 2, \dots, N_{C,i}\}, \{V_h^i, V_{m,x}^i\} \in \mathcal{G}_i, \{V_h^j, V_{m,x}^j\} \in \mathcal{G}_j, \quad (4)$$

其中 $y_B^{C_n}$ 为基站处接收到的信号, $y_{V_h^i}$ 为第 i 个簇中簇头 V_h^i 复用 C_n 时接收天线接收到的信号, $y_{V_{m,x}^i}$ 为第 i 个簇中第 x 个簇成员 $V_{m,x}^i$ 复用 C_n 时接收天线接收到的信号, P_k 和 s_k ($E\{|s_k|^2\} = 1$) 分别表示发送端 k ($k \in \{C_n, V_h^i, V_{m,x}^i\}$) 的发送功率和信号, d_{Ant} 表示车辆发射天线和接收天线间的距离, g_{Ant} 表示车辆发射天线和接收天线间的信道增益, $d_{T,R}$ 表示发射端 T 到接收端 R 的距离 (上述信道均可视为互逆信道 [5~7]), n_k 表示服从 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 分布的高斯 (Gauss) 噪声.

当 C_n 被 I_n 条 V-D2D 链路复用时, 由式 (2) 得到基站与 C_n 间的信干噪比 $\text{SINR}_B^{C_n}$ 为

$$\text{SINR}_B^{C_n} = \frac{P_{C_n,B} d_{C_n,B}^{-\alpha_0} |g_{C_n,B}|^2}{\sum_{i=1}^{I_n} (P_{V_h^i} d_{V_h^i,B}^{-\alpha_0} |g_{V_h^i,B}|^2 + P_{V_{m,x}^i} d_{V_{m,x}^i,B}^{-\alpha_0} |g_{V_{m,x}^i,B}|^2) + \sigma^2}, C_n \in \mathcal{C}', \{V_h^i, V_{m,x}^i\} \in \mathcal{G}_i. \quad (5)$$

FD-D2D 模型下第 i 个簇内簇头 V_h^i 与其第 x 个簇成员 $V_{m,x}^i$ 通信时, 由式 (3) 和 (4) 得到 V_h^i 和 $V_{m,x}^i$ 复用 C_n 时的信干噪比 $\text{SINR}_{V_h^i}^{C_n}$ 和 $\text{SINR}_{V_{m,x}^i}^{C_n}$ 分别为

$$\text{SINR}_{V_h^i}^{C_n} = \frac{P_{V_{m,x}^i} d_{V_{m,x}^i, V_h^i}^{-\alpha_2} |g_{V_{m,x}^i, V_h^i}|^2}{P_{C_n} d_{C_n, V_h^i}^{-\alpha_1} |g_{C_n, B}|^2 + \sum (P_{V_h^j} d_{V_h^j, V_h^i}^{-\alpha_2} |g_{V_h^j, V_h^i}|^2 + P_{V_{m,x}^j} d_{V_{m,x}^j, V_h^i}^{-\alpha_2} |g_{V_{m,x}^j, V_h^i}|^2) + n_{V_h^i}}, \quad (6)$$

$$\text{SINR}_{V_{m,x}^i}^{C_n} = \frac{P_{V_h^i} d_{V_h^i, V_{m,x}^i}^{-\alpha_2} |g_{V_h^i, V_{m,x}^i}|^2}{P_{C_n} d_{C_n, V_{m,x}^i}^{-\alpha_1} |g_{C_n, V_{m,x}^i}|^2 + \sum (P_{V_h^j} d_{V_h^j, V_{m,x}^i}^{-\alpha_2} |g_{V_h^j, V_{m,x}^i}|^2 + P_{V_{m,x}^j} d_{V_{m,x}^j, V_{m,x}^i}^{-\alpha_2} |g_{V_{m,x}^j, V_{m,x}^i}|^2) + n_{V_{m,x}^i}}. \quad (7)$$

簇头 V_h^i 复用簇内 V-D2D 链路资源组播时 $V_{m,x}^i$ 的归一化信道容量为

$$C_{V_{m,x}^i} = \sum_{d=1}^{N_{D,g}} K_d^g \left(\log_2 \left(1 + \text{SINR}_{V_{m,x}^i}^{C_n} \right) \right). \quad (8)$$

3 HG-C 策略与簇间频谱复用准则

本节提出基于 DLD 值的 HG-C 策略, 该策略由分布式 VUE 完成以 DLD 值为度量的超边粗化, 生成候选簇集合, 再由基站完成关联簇集合分割任务. 并在此基础上, 提出基于道路属性的局部簇维护算法来简化簇维护过程. 同时, 针对簇间频谱复用问题, 提出兼顾簇间间距和簇内成员数量的加权簇间频谱复用准则.

3.1 HG-C 策略中 DLD 的定义

本文采用 DLD 作为超边粗化的度量, 为了适应不同场景定义权重因子 $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$ 来描述相关距离 $r_{V_p, V_q}(t)$ 、相关方向 $d_{V_p, V_q}(t)$ 、相关速度 $v_{V_p, V_q}(t)$ 和相关加速度 $a_{V_p, V_q}(t)$ 对 DLD 的重要程度, 则 V_p 和 V_q 间的 DLD 值 $D_{V_p, V_q}(t)$ 和 V_p 的平均链路依赖度 (average degree of link dependence, ADLD) $\bar{D}_{V_p}(t)$ 分别为^[10]

$$D_{V_p, V_q}(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } r_{V_p, V_q}(t) > d_{\max}^V, \text{ or } d_{V_p, V_q}(t) < 0, \\ \beta_1 \frac{d_{\max}^V - r_{V_p, V_q}(t)}{d_{\max}^V} + \beta_2 d_{V_p, V_q}(t) + \beta_3 v_{V_p, V_q}(t) + \beta_4 a_{V_p, V_q}(t), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (9)$$

$$\bar{D}_{V_p}(t) = \frac{1}{N_{\text{Nei}(V_p)}} \sum_{V_i \in \text{Nei}(V_p)} D_{V_p, V_i}(t), \quad (10)$$

其中 $\sum_{i=1}^4 \beta_i = 1$, $\text{Nei}(V_p)$ 和 $N_{\text{Nei}(V_p)}$ 分别表示 V_p 在 VUE 最大通信距离 $d_{\max}^V$ 约束下可以建立 FD-D2D 通信链路的邻居集合和邻居数量. 特别指出, 本文采用 VISSIM 软件仿真生成实时交通流数据, 为了方便计算相关方向, 借助方向角的定义对 $d_{V_p, V_q}(t)$ 重新定义, 如下所示:

$$d_{V_p, V_q}(t) = \frac{|o_{V_q}(t) + o_{V_p}(t)|}{|o_{V_q}(t)| + |o_{V_p}(t)|}, \quad (11)$$

其中 $o_{V_q}(t) = o_{V_q}(t-1) + \arctan(y_{V_q}(t) - y_{V_q}(t-1)/x_{V_q}(t) - x_{V_q}(t-1))$ 为 VUE 的行驶方向角, 而 $L_{V_x}(t) = (x_{V_x}(t), y_{V_x}(t))$ 为 t 时刻的平面坐标 ($V_x, V_p, V_q \in \mathcal{V}$).

为了便于描述以 DLD 为度量的 HG-C 策略, 定义 VUE 周期性交换的 Beacon 信息、邻居列表与簇信息列表结构, 如图 3 所示, 图中 $c(V_n)$ 表示簇头 V_n 的簇成员集合, $\bar{D}_{V_n}^c(t) = \sum_{V_i \in c(V_n)} D_{V_n, V_i}(t) / N_{V_n}^c$ 为簇内成员的平均链路依赖度, $N_{V_n}^c$ 表示 $c(V_n)$ 内簇成员的数量.

Node ID	Velocity	Acceleration	Location	Cluster Node ID	ADLD	C-ADLD
V_n	$v_{V_n}(t)$	$a_{V_n}(t)$	$L_{V_n}(t)$	$c(V_n)$	$\bar{D}_{V_n}(t)$	$\bar{D}_{V_n}^c(t)$

The data structure of beacon information The data structure of cluster list

Neighbor node ID	Velocity	Acceleration	Location	DLD	Link	ADLD
$V_m \in \text{Nei}(V_n)$	$v_{V_m}(t)$	$a_{V_m}(t)$	$L_{V_m}(t)$	$D_{V_n, V_m}(t)$	$L(V_m, V_n)$	$\bar{D}_{V_m}(t)$
...	...	...	...	...	...	...

The data structure of neighbor list

图 3 数据结构

Figure 3 Data structure

3.2 HG-C 策略中的簇生成

本小节利用分布式 VUE 的计算能力协助基站实现 HG-C 策略, 该策略将基于 DLD 的超边粗化与簇生成算法部署到分布式 VUE 端, 将基于邻接矩阵的关联簇集合分割算法部署到基站端 (整体流程如图 4 所示), 降低基站计算能力的消耗.

3.2.1 分布式 VUE 端基于 DLD 的超边粗化与簇生成算法

结合 HG 模型^[14~16]与图 4 定义 VUE 协助基站生成的 HG 模型为

$$\mathcal{H}' = (\mathcal{V}', \mathcal{G}', \mathcal{W}'), \quad (12)$$

其中 $\mathcal{V}' = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$ 为 M 辆 VUE 组成的顶点集合, $\mathcal{G}' = \{\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_{G'}\}$ 为超边粗化生成的超边集合 (候选簇集合), $\mathcal{W}' = \{w(\mathcal{G}_1), w(\mathcal{G}_2), \dots, w(\mathcal{G}_{G'})\}$ 为对应超边权重集合.

为了描述候选簇的簇成员与簇头间的权重, 以及对超边粗化生成的候选簇集合进行分类, 根据图 4 做出如下定义.

定义1 若顶点 $V_q \notin \text{Nei}(V_p^{h'})$, 表示 V_q 与 $V_p^{h'}$ 间不存在连接, 则 $L(V_p^{h'}, V_q) = 0$.

定义2 若顶点 $V_q \in \text{Nei}(V_p^{h'})$, $V_q \notin c(V_p^{h'})$, 表示 V_q 与 $V_p^{h'}$ 间的连接为弱连接 (weak-link), 则 $L(V_p^{h'}, V_q) = 1$.

定义3 若顶点 $V_q \in \text{Nei}(V_p^{h'})$, $V_q \in c(V_p^{h'})$, 表示 V_q 与 $V_p^{h'}$ 间的连接为强连接 (strong-link), 则 $L(V_p^{h'}, V_q) = 2$. 特殊说明, 簇头 $V_p^{h'}$ 的连接权重记为 $L(V_p^{h'}, V_p^{h'}) = 2$.

定义4 若顶点 $V_n \in \mathcal{V}_{h'}$, ($\mathcal{V}_{h'}$ 为候选簇头组成的集合, $\mathcal{V}_{h'} \in \mathcal{V}$), 且 $\text{Nei}(V_n) = \emptyset$, 表示临时簇头 V_n 是一个孤立顶点 (孤儿车辆), 例如图 4 中 $\mathcal{G}_1$.

定义5 若顶点 $V_n \in \mathcal{V}_{h'}$, 且 $\forall L(V_m, V_n) = 2$, $V_m \in \text{Nei}(V_n)$, 表示候选簇头 V_n 形成超边 $\mathcal{G}_n$ 为闭合超边 (闭合簇), 例如图 4 中 $\mathcal{G}_{G'}$.

定义6 若顶点 $V_q, V_p \in \mathcal{V}_{h'}$, $V_q \neq V_p$, $\text{Nei}(V_q) \cap c(V_p) \neq \emptyset$ 或 $\text{Nei}(V_p) \cap c(V_q) \neq \emptyset$, 则 V_q 与 V_p 对应的超边 $\mathcal{G}_q$ 和 $\mathcal{G}_p$ 间存在关联, 故定义 $\mathcal{G}_r = \{\mathcal{G}_q, \mathcal{G}_p\}$ 为一个关联超边集合 (关联簇集合, $\mathcal{G}_r \in \mathcal{G}$), 例如图 4 中 $\mathcal{G}_{r,1} = \{\mathcal{G}_2, \mathcal{G}_3, \mathcal{G}_6\}$, $\mathcal{G}_{r,2} = \{\mathcal{G}_4, \mathcal{G}_5\}$.

图 4 (网络版彩图) 基于 HG-C 策略的簇生成示意图

Figure 4 (Color online) The diagram of clustering based on HG-C strategy

基于 DLD 的超边粗化与簇生成算法 (见算法 1) 可以部署在任意 VUE 端, 由 VUE 根据自身身份 (孤儿车辆、闭合簇集合和关联簇集合的候选簇头, 以及簇成员) 执行对应程序, 协助基站聚簇。

3.2.2 基站端基于邻接矩阵的关联簇集合分割算法

关联簇集合的候选簇头将邻居列表和簇成员列表上传给基站, 基站根据收到的信息建立邻接矩阵, 并对邻接矩阵进行分块对角化提取关联簇集合 (如图 4 所示)。然后, 对提取出来的关联簇集合, 以最大化簇内 VUE 与各候选簇头的连接权重为目标进行分割, 最后将聚簇结果回传给对应簇头。基站端基于邻接矩阵的关联簇集合分割算法, 如算法 2 所示。

3.2.3 基于道路属性的局部簇维护算法

考虑到簇生成后, 一段时间内网络拓扑相对稳定, 但是车辆的驶入和驶出引起的局部拓扑变换需要及时处理。为此, 提出基于道路属性驱动的局部簇维护策略, 该策略将簇维护任务分为更新已存在的簇、生成新的簇和解散无法维持的簇, 通过部分执行算法 1 和 2, 降低维护成本。其中, 更新已存在

算法 1 Hyperedge coarsening and cluster dividing based on DLD at the distributed VUE

Input: $d_{\max}^V$;

- 1: **while** Beacon information **do**
- 2: V_n receives Beacon information, calculates $D_{V_n, V_m}(t)$ by the formula of (9), creates the neighborhood list of V_n , and initializes $L(V_m, V_n) = 1$, where $V_m \in \text{Nei}(V_n)$;
- 3: **if** $\text{Nei}(V_n) = \emptyset$ **then**
- 4: $V_n \in \mathcal{V}_{h'}$;
- 5: **else**
- 6: Calculate $\bar{D}_{V_n}(t)$ by the formula of (10), and broadcast to $\text{Nei}(V_n)$;
- 7: Update the neighborhood list, and find out $\bar{D}_{V_{\max}}(t)$ with the max value of ADLD, $V_{\max} \in \text{Nei}(V_n)$;
- 8: **if** $\bar{D}_{V_n}(t) > \bar{D}_{V_{\max}}(t)$ **then**
- 9: V_n sends an join request to $V_{\max}$, and resets $L(V_{\max}, V_n) = 2$;
- 10: **else**
- 11: Mark V_n as a candidate cluster head, and form a coarsening hyperedge; then update the member list of the candidate cluster, and set $L(V_m, V_n) = 2$, $V_m \in c'(V_n)$;
- 12: **end if**
- 13: **end if**
- 14: **if** $\forall L(V_m, V_n) = 2$, $V_m \in \text{Nei}(V_n)$ **then**
- 15: $c'(V_n)$ is a closed hyperedge, and the vehicles in the hyperedge $\mathcal{G}_{V_n}$ are divided into a cluster $c(V_n)$;
- 16: **else**
- 17: Send the neighbor list and cluster member list to the base station;
- 18: **if** the related cluster members receive the cluster division result of the base station **then**
- 19: Send a join invitation to the corresponding member according to the member list divided by the base station, and then perform step 9;
- 20: **else**
- 21: V_n joins the corresponding cluster according to the invitation of the cluster head;
- 22: **end if**
- 23: **end if**
- 24: **end while**

的簇则存在两种情况, 一种是需要基站参与, 而另一种则只需分布式 VUE 便可实现. 策略的实现机制如下所示:

(1) VUE 端周期性的运行算法 1 的第 1 ~ 13 步, 更新孤儿车辆、闭合簇集合和关联簇集合, 生成新的孤儿车辆、闭合簇集合, 并解散无法维持的闭合簇集合;

(2) 若关联簇集合更新后簇头组合未发生变化, 该关联簇集合的簇头组合进一步执行算法 1 的第 18 ~ 22 步对簇成员进行更新, 该过程无需基站参与;

(3) 若关联簇集合更新后簇头组合发生变化, 该关联簇集合的簇头执行算法 1 的第 16 ~ 23 步, 将邻居列表和簇成员列表发送给基站, 由基站运行算法 2 重新对该关联簇集合进行分割, 最后由新的簇头组合簇维护.

3.2.4 簇间频谱复用准则

为了最大化簇间的频谱复用效率和公平性, 根据簇的两个属性定义基于簇间间距和簇内成员数量的加权簇间频谱复用准则如下:

$$\max_{V_p, V_q \in \mathcal{V}_h, V_p \neq V_q} [\theta |L_{V_p}(t) - L_{V_q}(t)| - (1 - \theta) |N_{C, V_p}(t) - N_{C, V_q}(t)|], \quad (13)$$

算法 2 Dividing of related cluster sets based on adjacency matrix at the base station

Input: Neighbor list and the cluster member list of candidate cluster head, $i = 1$;

- 1: The base station integrates the neighbor list of all candidate cluster heads to establish an adjacency matrix A ;
- 2: Perform block diagonalization on matrix A to obtain block diagonal matrix B ;
- 3: Extract the non-zero blocks on the diagonal of matrix B to obtain the adjacency matrix of the related cluster set $\mathcal{G}_r = \{\mathcal{G}_{r,1}, \mathcal{G}_{r,2}, \dots, \mathcal{G}_{r,N_r}\}$;
- 4: **while** $i \leq N_r$ **do**
- 5: Freely combine the column vectors of the adjacency matrix of the related cluster set $\mathcal{G}_{r,i}$, and take out the effective cluster head set $\mathcal{C}_{r,i}^h$ with full rank;
- 6: Find out the combination $\mathcal{C}_{r,i}^{h,\min}$ with the least number of cluster heads in $\mathcal{C}_{r,i}^h$;
- 7: **if** the number of cluster head combinations in $\mathcal{C}_{r,i}^{h,\min}$ is greater than one **then**
- 8: Find out the combination with the most weighted in $\mathcal{C}_{r,i}^{h,\min}$, and delete other combinations;
- 9: **end if**
- 10: Divide VUE to the candidate cluster with the largest connection weight;
- 11: $i++$;
- 12: **end while**

Output: Send the division result to the candidate cluster head.

$$|L_{V_p}(t) - L_{V_q}(t)| \geq 2d_{\max}^V, \quad (14)$$

其中 θ 为簇间距占的权重因子, $L_{V_p}(t)$ 为 t 时刻簇头 V_p 的平面坐标, $N_{C,V_p}(t)$ 为 t 时刻簇头为 V_p 的簇的成员数量。

4 基于 ILA 理论的复用资源分配机制

第 3 节利用 HG-C 策略将部分基站承担的拓扑管理任务卸载到了分布式 VUE 端, 不仅改善网络拓扑的稳定性, 减少基站的计算能力和带宽资源的消耗, 但是基于 Underlay 模式的 FD-D2D 通信和簇间频谱复用使得同频干扰问题变得更加复杂. 为了避免 FD-D2D 通信和簇间频谱复用应用过程对 CUE 产生严重干扰, 以及保证 VUE 通信的 QoS (quality of service). 本节基于 ILA 理论, 不依靠链路实时 CSI, 仅根据信号功率路径损耗^[17~19], 设计 VUE 的动态功率控制和复用资源的区域映射方法, 降低复用资源分配的复杂度, 并提高频谱效率。

4.1 基于 ILA 理论分析 VUE 最大发射功率上界

假设 t 时刻 C_n 的发射功率为 $P_{C_n B}$, C_n 被 I_n^t 对 FD-D2D 链路复用. 基站处接收到 C_n 的信号功率 $\bar{P}_{C_n B}$ 和复用 C_n 的 FD-D2D 链路叠加到基站处的干扰功率 $P_{I,C_n B}^t$ 分别为

$$\bar{P}_{C_n B} = d_{C_n, B}^{-\alpha_0} P_{C_n B} \approx \bar{P}_{CB}, \quad C_n \in \mathcal{C}', \quad (15)$$

$$P_{I,C_n B}^t = \sum_{i=1}^{I_n^t} \left(P_{V_h^i} d_{V_h^i, B}^{-\alpha_0} + P_{V_{m,x}^i} d_{V_{m,x}^i, B}^{-\alpha_0} \right) + \sigma^2 \leq w_B \approx \lambda_B \bar{P}_{CB}, \quad (16)$$

其中 $\bar{P}_{CB}$ 为基站处所接收 CUE 信号的平均功率, $d_{C_n, B}$ 为 C_n 与基站间的距离, w_B 表示蜂窝通信最大可容忍的干扰功率, λ_B 为 VUE 复用 CUE 信道时基站端的干扰信号比 (interference signal ratio, ISR) 门限。

为了进一步分析不同位置处 VUE 可采用的 $P_{\max}^V$, 对式 (16) 进行变换得到基站处干扰功率期望 $\bar{P}_{I,C_n B}$ 满足的不等式为

$$\bar{P}_{I,C_n B} \leq \mathbb{E} \left[2 \sum_{i=1}^{I_n^t} \left(P_{\max}^V (d_{V,B}^{\min})^{-\alpha_0} \right) \right] = 2 \bar{I}_{d_{\max}^V, M} P_{\max}^V (d_{V,B}^{\min})^{-\alpha_0}, \quad (17)$$

其中 $d_{V,B}^{\min}$ 为 $\mathcal{D}_{C_n}$ 中距基站最近 VUE 到基站的距离, $\bar{I}_{d_{\max}^V, M} = \mathbb{E}[\sum_{d=1}^{N_{C,V_n}} K_d (d_{\max}^V, M)]$ 为车流量取 M 和簇半径取 $d_{\max}^V$ 时 $\mathcal{D}_{C_n}$ 中 FD-D2D 链路数量的期望值 ($\bar{P}_{I,C_n B}$ 中忽略高斯白噪声^[17~19]).

联立式 (16) 和 (17) 得到以 $d_{V,B}^{\min}$ 和 $d_{C,B}$ 为变量的 VUE 最大发射功率上界表达式为

$$P_{\max}^V (d_{V,B}^{\min}, d_{C,B}) \leq \frac{\lambda_B P_{\max}^C}{2 \bar{I}_{d_{\max}^V, M}} \left(\frac{d_{V,B}^{\min}}{d_{C,B}} \right)^{\alpha_0}, \quad (18)$$

其中 $P_{\max}^C$ 为 CUE 的最大发射功率, $d_{C,B}$ 为 CUE 到基站距离. 在式 (18) 约束下, VUE 可根据 QoS 需求动态地控制发射功率.

4.2 基于 ILA 理论分析 VUE 与复用 CUE 的距离关系

忽略经过自干扰的影响^[19~22], FD-D2D 通信的接收端 V_i 遭受的干扰信号功率为

$$w_{V_i} = P_{C_n} d_{C_n, V_i}^{-\alpha_1} + \sum_{\mathcal{D}_i^{C_n}, \mathcal{D}_j^{C_n} \in \mathcal{D}_{C_n}} \left(P_{V_h^j} d_{V_h^j, V_m}^{-\alpha_2} + P_{V_{m,x}^j} d_{V_{m,x}^j, V_i}^{-\alpha_2} \right), \quad \mathcal{D}_j^{C_n} = \{V_h^j, V_{m,x}^j\}, \quad (19)$$

由式 (18) 和 $d_{\max}^V$, 得到 VUE 遭受的最大干扰信号功率 w_D 为

$$w_D = P_{\max}^C (d_{C,V})^{-\alpha_1} + 2 (\bar{I}_{d_{\max}^V, M} - 1) (2 d_{\max}^V)^{-\alpha_2} P_{\max}^V (d_{V,B}^{\min}, d_{C,B}) \geq w_{V_i}, \quad (20)$$

其中 $d_{C,V}$ 为 CUE 到 VUE 的距离.

以基站为平面坐标系原点, 记 C_n 的坐标为 $L_{C_n} = (x_n, y_n)$, 道路上某一对 FD-D2D 链路的簇成员 (或簇头) V_m 坐标为 $L_{V_m} = (a_m, b_m)$, 则当 VUE 的 ISR 门限为 $\lambda_D \leq w_D / (d_{\max}^V)^{-\alpha_2} P_{\max}^V$ 时, 满足 VUE 复用的 CUE 与 VUE 的距离关系不等式为

$$\left((a_m - x_n)^2 + (b_m - y_n)^2 \right) \leq \left(\frac{P_{\max}^C (d_{\max}^V)^{\alpha_2}}{\lambda_D - 2^{1-\alpha_2} (\bar{I}_{d_{\max}^V, M} - 1)} \right)^{\frac{2}{\alpha_1}} \left(\frac{\lambda_B P_{\max}^C}{2 \bar{I}_{d_{\max}^V, M}} \right)^{2\alpha_1} \left(\frac{x_n^2 + y_n^2}{a_m^2 + b_m^2} \right)^{\alpha_0 \alpha_1}. \quad (21)$$

4.3 基于复用区域映射的资源分配机制

根据不等式 (21) 得到描述蜂窝小区内 C_n 与特定直行路段 $R_{\text{str-lane}}$ 复用关系函数 $f(x_n, y_n)$ 为

$$f(x_n, y_n) = \frac{((a_m - x_n)^2 + (b_m - y_n)^2)(a_m^2 + b_m^2)^{\alpha_0 \alpha_1}}{(x_n^2 + y_n^2)^{\alpha_0 \alpha_1}} - \left(\frac{P_{\max}^C (d_{\max}^V)^{\alpha_2}}{\lambda_D - 2^{1-\alpha_2} (\bar{I}_{d_{\max}^V, M} - 1)} \right)^{\frac{2}{\alpha_1}} \left(\frac{\lambda_B P_{\max}^C}{2 \bar{I}_{d_{\max}^V, M}} \right)^{2\alpha_1}. \quad (22)$$

若位于 (x_n, y_n) 处的 C_n 可以使任意 $(a_m, b_m) \in R_{\text{str-lane}}$ 满足 $f(x_n, y_n) > 0$ 的条件时, 则 C_n 为直行道路 $R_{\text{str-lane}}$ 的可选复用 CUE. 考虑到基站覆盖范围内直行道路位置固定的特点, 可以将单向直

表 2 参数
Table 2 Parameter

Parameter	Value	Unit
The radius of the cell	500	m
Shadow fading	2	dB
The SINR threshold for cellular links	12	dB
The maximum transmit power for CUE ($P_{\max}^C$)	23	dBm
The power of Gaussian white noise	-174	mW
Interference signal ratio at the base station (λ_B)	0.01	-
Path loss factors ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$)	3, 4, 3.5	-
The weighting factors for DLD (β)	0.3, 0.1, 0.55, 0.05	-
The number of CUEs	40, 90, 160	-
The number of VUEs	500	-
Maximum communication distance between vehicles	20-300	m
Vehicle speed	40-50	km/h

行道路的可复用 CUE 集合筛选转化为可选复用 CUE 所处区域的确定, 则利用点集定义得到 $R_{\text{str-lane}}$ 可复用资源所处的映射区域为

$$\mathcal{Z}_{R_{\text{str-lane}}} = \bigcup_{\substack{(a_m, b_m) \in R_{\text{str-lane}}, \\ f(x_n, y_n) > 0}} (x_n, y_n). \quad (23)$$

确定了 $R_{\text{str-lane}}$ 对应复用区域后, 基站以最小化 CUE 与 VUE 间的互干扰功率为原则, 先采用轮询的模式给每一对 FD-D2D 链路复配复用资源, 然后基于加权簇间频谱复用准则对满足簇间频谱复用准则的频谱资源进行簇间复用分配. 需要说明, $\mathcal{Z}_{R_{\text{str-lane}}}$ 是对点集进行快速凸包计算^[23]后所得边界围成的区域, 不同直行道路对应的复用区域可以重叠. 因为基站以轮询的模式实现 FD-D2D 链路 with CUE 配对, 已分配的资源除非满足簇间频谱复用准则, 否则不会被再次分配.

若该分配机制下 C_n 被 $\bar{I}_{d_{\max}^V, M}$ 对 FD-D2D 链路复用, 则被复用 C_n 所占频谱资源的归一化信道容量表达式为

$$\bar{C} = \log_2 \left(1 + \text{SINR}_B^{C_n} \right) + \sum_{i=1}^{\bar{I}_{d_{\max}^V, M}} \log_2 \left(\left(1 + \text{SINR}_{V_h^i}^{C_n} \right) \left(1 + \text{SINR}_{V_{m,x}^i}^{C_n} \right) \right), \quad (24)$$

其中 $\bar{I}_{d_{\max}^V, M}$ 对 FD-D2D 链路应位于不同 $R_{\text{str-lane}}$ 上, 相应的 C_n 应该处于与 $R_{\text{str-lane}}$ 对应的 $\mathcal{Z}_{R_{\text{str-lane}}}$ 集合的重叠区域.

5 仿真分析

本节采用交通仿真建模软件 VISSIM 建立十字交叉路口模型, 分别产生车流稀疏 (车流量为 40 辆和 90 辆) 和密集 (车流量为 160 辆) 环境下车辆的实时 TSI 信息作为分析对象, 验证本文所提资源管理方案的有效性, 其中参数设置如表 2 所示^[6, 10, 19].

图 5 (网络版彩图) 簇的平均生存时间与 VUE 最大通信距离的关系

Figure 5 (Color online) Relationship between average life-time of clusters and maximum communication distance between VUE

图 6 (网络版彩图) 簇间频谱平均复用频次分析

Figure 6 (Color online) Analysis of the average sharing times of channels between clusters

5.1 簇生存时间和频谱复用效率的性能分析

本小节对 HG-C 策略 (仿真图中简称为 HG) 和基于 Kmeans^[12] 的聚簇策略进行仿真, 利用统计学对仿真数据进行处理后得到如图 5 所示的簇平均生存时间对比图和 HG-C 策略的簇内成员数量与 $d_{\max}^V$ 关系图. 从图 5 的主图可以看出随着车流量的增加, 簇平均生存时间均变小, 但是不同车流量下 HG-C 策略生成簇的平均生存时间均比基于 Kmeans 聚簇策略长. 而图 5 右上角的簇内成员数量与 $d_{\max}^V$ 关系图显示, 车流稀疏的环境中 $d_{\max}^V < 100$ m 后簇内成员数量缓慢增加, 而车流密集的环境中 $d_{\max}^V > 220$ m 后数量还出现了一次剧增. 结合上述分析, 可知 $d_{\max}^V$ 越小通信拓扑越稳定, 链路资源发现与维护开销越低, 但是簇内成员数量较低导致可供簇间复用的频谱资源不足, 影响频谱复用效率. 为此, 将对簇间频谱复用频率的效果进行仿真.

考虑到频谱复用效率受簇间复用频次和簇内成员数量的影响, 在图 5 的基础上, 首先统计分析了三组车流量下 θ 与簇间复用频次关系, 结果如图 6 左下角的子图所示, 从图 6 中可以看出 θ 的最优取值分别为 0, 0, 0.6. 然后基于最优 θ 分析 $d_{\max}^V$ 取 100 ~ 300 m 时, $d_{\max}^V$ 与簇间复用频次的关系如主图所示, 3 种车流量下 $d_{\max}^V$ 的最佳取值分别为 160 m, 210 m 和 110 m. 将对应最佳 $d_{\max}^V$ 取值作为 HG-C 策略中算法 1 的输入, 仿真得到如图 7 所示的聚簇结果. 并对图 7 聚簇过程中分布式 VUE 和基站分别承担的聚簇任务量进行统计, 结果如图 8 所示. 从图 7 可以看出随着车流量的增加网络拓扑也随之变得复杂, 导致图 8 中基站承担的拓扑任务比重有所上升, 但是车流量为 160 时基站承担的任务量依然降低了 51.6%, 说明分布式 VUE 协助聚簇的策略十分有效.

5.2 VUE 最大发射功率上界和频谱复用效率分析

本小节在蜂窝满负荷的情况下, 对基于 ILA 理论的 VUE 功率控制和复用资源分配机制进行仿真分析. 首先, 仿真得到已知基站和复用 CUE 位置时 $P_{\max}^V$ 的上界, 如图 9 所示. 从图 9 中可以看出, 当 VUE 与基站的距离小于 100 m 时 $P_{\max}^V$ 的取值小于 -50 dBm, 尤其当 CUE 与基站的距离大于 200 m

图 7 (网络版彩图) 聚簇结果示意图

Figure 7 (Color online) The diagram of clustering result

时, $P_{\max}^V$ 被限制得更低, 从这角度分析可知 FD-D2D 通信时, 复用的 CUE 应该尽可能靠近基站, 同时基站应该部署在离道路较远的位置. 表明基于 ILA 推导得到的 VUE 最大发射功率上界表达式 (18), 可以在场景确定的情况下将复杂的 VUE 功率优化问题转化为基于式 (18) 的 VUE 功率动态调节.

根据所提 VUE 动态功率控制和复用资源分配机制, 仿真得到 FD-D2D 车载通信模型中 λ_D 与簇内 V-D2D 链路和簇头组播时归一化的平均信道容量如图 10 所示. 图 10 中显示 λ_D 取 0 ~ 0.5 时, 3 组不同车流量 (40, 90 和 160 辆) 下 V-D2D 链路归一化的平均信道容量处于 12 ~ 17 bit/Hz/s 之间; 而簇头组播 (multicast) 时各簇成员接收链路归一化的平均信道容量分别在 20 bit/Hz/s, 45 bit/Hz/s 和 70 bit/Hz/s 附近波动. 上述分析表明 FD-D2D 车载通信模型中簇头复用簇内成员的链路资源组播获得的平均信道容量增益是 HD 模式的 2 ~ 6 倍. 图 11 分析了 λ_D 取 0 ~ 0.5 时, 传统蜂窝网络中 CUE、FD-D2D 车载通信模型、半双工 V-D2D 通信, 以及 FD-D2D 车载通信模型中 CUE (图中分别简称为 CUE, CUE+V-D2D+Multicast, CUE+V-D2D 和 CUE in V-D2D) 通信时归一化的平均信道容量, 从图中可以看出本文所提 FD-D2D 车载通信模型中, CUE 归一化的平均信道容量损失仅为 2 bit/Hz/s, 而归一化平均信道容量增益则达到 10 bit/Hz/s, 较半双工 V-D2D 通信增加了 10%.

图 8 (网络版彩图) 承担的拓扑管理任务比例

Figure 8 (Color online) Proportion of topology management tasks undertaken

图 9 (网络版彩图) VUE 最大发射功率的上界

Figure 9 (Color online) Upper bound of VUE maximum transmit power

图 10 (网络版彩图) 簇内 V-D2D 链路和簇头组播的归一化平均信道容量

Figure 10 (Color online) Normalized average channel capacity of V-D2D links and cluster head multicast in clusters

图 11 (网络版彩图) 不同模式下的归一化平均信道容量

Figure 11 (Color online) Normalized average channel capacity in different modes

6 结论

本文建立一种基于 Underlay 模式的 FD-D2D 车载通信模型, 该模型以 HG-C 策略为基础对 VUE 进行聚簇, 分别将超边粗化和细化分割部署在分布式 VUE 和基站端, 降低了基站在链路资源发现和维护过程中承担的开销. 同时, 利用基于 ILA 理论的动态功率控制和频谱复用区域映射策略管理 FD-D2D 通信资源, 发挥出了 FD-D2D 通信和簇间频谱复用的优势, 提高了频谱复用效率. 仿真结果表明,

最佳 $d_{\max}^V$ 取值下的平均链路持续时间超过 14 s, 分布式 VUE 承担的链路管理任务超过一半, 而且簇头复用簇内 V-D2D 链路资源组播融合 TSI 时簇成员的平均信道容量增益最高可达 HD 模式的 6 倍。

参考文献

- 1 Li Y, Jiang T, Sheng M, et al. QoS-aware admission control and resource allocation in underlay device-to-device spectrum-sharing networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2016, 34: 2874–2886
- 2 Lin M, Hua J Y, Li S N, et al. Accurate joint estimation of Doppler shift and SNR in mobile communications with high vehicle speed. *Sci Sin Inform*, 2017, 47: 1705–1714 [林敏, 华惊宇, 李溯南, 等. 移动通信中适用于高车速环境的精确 Doppler 频移与信噪比联合估计算法. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47: 1705–1714]
- 3 Ansari R I, Chrysostomou C, Hassan S A, et al. 5G D2D networks: techniques, challenges, and future prospects. *IEEE Syst J*, 2018, 12: 3970–3984
- 4 Ma X B, Peng J H, Xue L, et al. Integrated security of cyber-physical vehicle networked systems in the age of 5G. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 1640–1658 [马小博, 彭嘉豪, 薛磊, 等. 5G 时代车联网信息物理融合系统综合安全研究. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1640–1658]
- 5 Cheng N, Zhou H, Lei L, et al. Performance analysis of vehicular device-to-device underlay communication. *IEEE Trans Veh Technol*, 2017, 66: 5409–5421
- 6 Ren Y, Liu F, Liu Z, et al. Power control in D2D-based vehicular communication networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 2015, 64: 5547–5562
- 7 Sun W, Yuan D, Strom E G, et al. Cluster-based radio resource management for D2D-supported safety-critical V2X communications. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2016, 15: 2756–2769
- 8 Sun W, Strom E G, Brannstrom F, et al. Radio resource management for D2D-based V2V communication. *IEEE Trans Veh Technol*, 2016, 65: 6636–6650
- 9 Sun P, Shin K G, Zhang H, et al. Transmit power control for D2D-underlaid cellular networks based on statistical features. *IEEE Trans Veh Technol*, 2017, 66: 4110–4119
- 10 Chen Q, Wu F, Leng S, et al. Degree of link dependence-based LTE-V2V clustering and alarm information forwarding. In: *Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications*, 2016. 6
- 11 Khan A A, Abolhasan M, Ni W. An evolutionary game theoretic approach for stable and optimized clustering in VANETs. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67: 4501–4513
- 12 Zhou Z, Yu H, Xu C, et al. Dependable content distribution in D2D-based cooperative vehicular networks: a big data-integrated coalition game approach. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2018, 19: 953–964
- 13 Xiao H, Chen Y, Zhang Q, et al. Joint clustering and power allocation for the cross roads congestion scenarios in cooperative vehicular networks. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2019, 20: 2267–2277
- 14 Selvitopi O, Acer S, Aykanat C. A recursive hypergraph bipartitioning framework for reducing bandwidth and latency costs simultaneously. *IEEE Trans Parallel Distrib Syst*, 2017, 28: 345–358
- 15 Purkait P, Chin T J, Sadri A, et al. Clustering with hypergraphs: the case for large hyperedges. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2017, 39: 1697–1711
- 16 Chen C, Wang B, Zhang R. Interference hypergraph-based resource allocation (IHG-RA) for NOMA-integrated V2X networks. *IEEE Internet Things J*, 2019, 6: 161–170
- 17 Min H, Lee J, Park S, et al. Capacity enhancement using an interference limited area for device-to-device uplink underlaying cellular networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10: 3995–4000
- 18 Sun J, Zhang Z, Xiao H, et al. Uplink interference coordination management with power control for D2D underlaying cellular networks: modeling, algorithms, and analysis. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67: 8582–8594
- 19 Liu F, Hou X, Liu Y. Capacity improvement for full duplex device-to-device communications underlaying cellular networks. *IEEE Access*, 2018, 6: 68373–68383
- 20 Zhang D D, Wang X, Zhang Z S. Key techniques research on full-duplex wireless communications. *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 951–964 [张丹丹, 王兴, 张中山. 全双工通信关键技术研究. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 951–964]
- 21 Zhang G, Yang K, Liu P, et al. Power allocation for full-duplex relaying-based D2D communication underlaying cellular networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 2015, 64: 4911–4916
- 22 Xie X Z, Fu Y Q, Chen J J. Energy efficiency and throughput maximization scheme based on joint antenna selection

- and beamforming optimization in FD-SWIPT bidirectional relay systems. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 1217–1230 [谢显中, 扶渝茜, 陈九九. FD-SWIPT 双向中继系统中基于天线选择与波束成形联合优化的高能效和吞吐量最大化方案. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1217–1230]
- 23 Cadenas J, Megson G M. Rapid preconditioning of data for accelerating convex hull computations. *Electron Lett*, 2014, 48: 270–272

Resource management scheme for full-duplex device-to-device vehicular communication using hypergraph clustering and interference limited area theory

Hailin XIAO^{1,2}, Bin WU², Zhongshan ZHANG³, Chengxiang WANG^{4,5*} & Di ZHOU⁶

1. School of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China;
2. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
3. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
4. State Key Laboratory of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China;
5. Laboratory of Network Communication and Security, Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China;
6. Zhejiang Yushi Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

* Corresponding author. E-mail: chxwang@seu.edu.cn

Abstract In cellular vehicle-to-everything systems, the rapid movement of vehicles leads to the network topology instability of device-to-device (D2D) links. The frequent reconfiguration of network topology increases the complexity of the same frequency interference problem and the amount of signaling overhead for the management of network topology, which result in the waste of the computation ability and bandwidth resources of the base station (BS). In this paper, we establish a full-duplex device-to-device (FD-D2D) vehicular communication model with cluster as the core and propose a resource management scheme for FD-D2D vehicular communication by using hypergraph clustering and interference limited area theory. In the proposed scheme, the degree of link dependence and the computation ability of vehicle users are utilized to improve the cluster survival time and reduce the BS overhead. Meanwhile, dynamic power control and sharing area mapping are used to assist the BS in allocating resources, reduce the co-frequency interference between vehicular device-to-device (V-D2D) links and between V-D2D links and cellular links that reuse the same frequency, and improve spectrum efficiency. Real-time traffic flow data are generated by the traffic simulation modeling software VISSIM to verify the proposed resource management scheme. Simulation results show that the network topology management workload of the BS is reduced by at least 50%. Relative to that in traditional cellular D2D vehicle communication, the average frequency of spectrum sharing in FD-D2D communication increases by more than 0.5 times, and the spectrum efficiency increases by 10%.

Keywords cellular vehicle-to-everything, hypergraph clustering, interference limited area, full-duplex device-to-device vehicular communication, spectrum sharing

Hailin XIAO received his B.S. degree from Wuhan University in 1998, his M.S. degree from Guangxi Normal University in 2004, and his Ph.D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2007. He is currently a professor in the School of Computer and Information Engineering, Hubei University. His research interests include cooperative communication and cognitive radio.

Bin WU was born in 1994. He received his B.S. degree from Xi'an Jiaotong University City College in 2017. He is currently pursuing his M.S. degree at Guilin University of Electronic Technology. His research interests include cellular vehicle-to-everything communication and cooperative communication.

Zhongshan ZHANG received his B.E. and M.S. degrees in Computer Science and his Ph.D. degree in Electrical Engineering from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1998, 2001, and 2004, respectively. He is currently a professor in the School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology. His research interests include self-organized networking and cooperative communications.

Chengxiang WANG received his Ph.D. degree from Aalborg University, Denmark, in 2004. He has been with Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, since 2005, and he became a professor in 2011. In 2018, he joined Southeast University as a professor. His research interests include wireless channel measurements/modeling and (B)5G wireless communication networks.