

蜂窝车联网中基于服务异构性的V2V通信资源分配算法研究

李一兵^{①②} 王宁馨^{①②} 吕威^{*③}

^①(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

^②(先进船舶通信与信息技术工业和信息化部重点实验室 哈尔滨 150001)

^③(联通(黑龙江)产业互联网有限公司 哈尔滨 150001)

摘要: 在支持车与车直接通信(V2V)的蜂窝网络场景下, 针对密集环境下复用车与设备(V2I)上行链路的资源分配问题, 在V2V的干扰下, 利用移动链路的信道状态信息(CSI)的慢衰落统计, 联合通信可靠性、功率控制, 建立最大化V2I信道容量的优化模型以满足车辆网络服务的异构性的需求。基于此, 该文提出一种基于超图理论和遗传算法的资源分配算法。仿真结果表明, 该算法在保证V2V通信可靠性的前提下, 提高了V2I的信道容量。

关键词: V2V通信; 资源分配; 超图理论; 遗传算法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)01-0235-08

DOI: 10.11999/JEIT211160

Research on Resource Allocation Algorithm Based on Service Heterogeneity in V2V Communication in C-V2X

LI Yibing^{①②} WANG Ningxin^{①②} LÜ Wei^③

^①(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

^②(Key Laboratory of Advanced Marine Communication and Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

^③(Unicom (Heilongjiang) Industrial Internet Co., Ltd, Harbin 150001, China)

Abstract: In a cellular network scenario that supports direct Vehicle-to-Vehicle(V2V) communication, the resource allocation problem of the uplink of multiple Vehicle-to-Infrastructure (V2I) in a dense environment is used. Under the interference of V2V, the slow fading statistics of the Channel State Information (CSI) of the mobile link is used, joint communication reliability, power control, an optimization model is established that maximizes the V2I channel capacity to meet the needs of heterogeneous vehicle network services. Based on this, a resource allocation algorithm based on hypergraph theory and genetic algorithm is proposed. The simulation results show that the algorithm improves the channel capacity of V2I under the premise of ensuring the reliability of V2V communication.

Key words: Vehicle-to-Vehicle(V2V) communication; Resource allocation; Hypergraph theory; Genetic algorithm

1 引言

蜂窝车联网(Cellular Vehicle-to-Everything, C-V2X)能够给行驶的车辆提供碰撞预警、车速引

导、路况查询等服务, 来保证车辆行驶的安全和高效, 为自动驾驶铺平道路。广泛部署的蜂窝网络在实现高效、可靠的车与车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)通信, 车与设备(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)通信以及提供高移动性免疫力方面显示出巨大潜力^[1-3]。

车联网的资源分配实际是竞争问题的优化得到最合理的分配, 密集环境下的通信系统的资源分配问题较为复杂。图论作为解决离散问题的有效工具, 长期以来一直被用于无线网络的资源分配设计^[4]。文献^[5]提出启发式算法, 该算法适应车辆信道的大

收稿日期: 2021-10-21; 改回日期: 2022-02-26; 网络出版: 2022-03-08

*通信作者: 吕威 lvwei1860365@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51809056), 先进船舶通信与信息技术工信部重点实验室项目(AMCIT21V3)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (51809056), The Key Laboratory of Advanced Marine Communication and Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology (AMCIT21V3)

规模衰落, 资源块不同的设备到设备(Device-to-Device, D2D)通信可用车辆之间共享, 基于V2V聚类结果, 频谱共享设计被顺序更新以最大化总V2I容量。文献[6]充分考虑了车辆的移动性, 利用二分图最大匹配算法中的匈牙利算法进行最佳资源分配, 得到了更加准确的蜂窝系统容量。文献[7]提出了一种基于D2D的资源分配方式, 利用社交信息相关度对用户进行划分, 利用匈牙利算法进行资源分配使系统吞吐量最大化。文献[8]对LTE后续演进(LTE-Advanced, LTE-A)网络中上行链路的D2D通信根据用户对信道的喜好程度建立特征值列表, 利用二部图最大权匹配方法进行资源分配。文献[9]基于图论均衡了V2I链路和V2V链路的需求, 最大化车辆用户的吞吐量。文献[10]考虑非视距干扰和多用户干扰, 提出基于图神经网络的功率控制策略, 最大化吞吐量。文献[11]采用基于免疫克隆的算法, 最大化车辆效用, 通过图染色方法避免相邻车辆之间的干扰, 该算法更侧重车辆优先级, 并未考虑基站的功率分配。文献[12]针对城市场景中V2V通信资源分配的干扰问题, 提出了根据行驶方向进行资源划分的方法, 以降低干扰冲突。文献[13]基于车辆的位置提出了一种重用距离的贪心算法, 但贪心算法只能得到当前情况下的最优解, 无法保证全局的最优。文献[14]进一步改进了匹配算法, 提出了3维匹配算法, 但算法并未考虑V2V的可靠性, 仅侧重车载系统的吞吐量。

综上所述, 在交通密集环境下, 高密度车流聚集, 车辆节点频繁竞争固定分配的有限资源会使通信可靠性下降, 现有文献虽然考虑了资源利用率、吞吐量等关键网络指标, 但缺少对车辆服务异构性的考虑, 复用信道资源的研究还存在一定的不足。由于车辆的移动性, 周期业务的传输需要保证较高的通信可靠性, 非周期业务如视频、图像等的传输需要更高的传输速率, 因此对于车辆链路服务的异构性与通信可靠性的研究具有重要意义。针对以上不足, 本文的贡献如下:

首先, 复用V2I上行链路以支持密集环境下的车辆通信, 为了支持车辆网络的服务异构性, 本文最大化高带宽应用的V2I链路容量, 并引入V2V链路的可靠性约束, 这对安全消息传播至关重要, 进一步保证密集环境下的通信质量, 减少资源冲突的发生。

其次, 本文基于V2V的车辆网络的资源分配, 其中一个V2I链路或多个V2V链路共享频谱, 并且不同的车辆链路具有不同的服务质量要求。信道状态信息反馈会由于极高的车辆移动性而导致大量的信令开销, 与现有的基于信道状态信息反馈的研究

不同, 本文利用移动链路的缓慢变化的大规模衰落信道状态信息以减少信令开销。

最后, 提出一种低复杂度的3维匹配算法来寻找V2I和V2V链路之间的最佳频谱共享策略, 并适当调整它们的发射功率。在一定程度上, 基于超图-遗传理论的资源分配方法在密集环境下对资源冲突问题的解决上超越了现有的一些传统方法, 提升了车联网的异构性能。

2 系统模型及问题建模

2.1 系统模型

本文场景如图1所示, 高速公路场景下设计 M 个V2I链路由 M 个单天线车辆发起, 密集环境下为了避免资源冲突, V2V用户共享V2I的频谱, 由于车辆网络的服务异构性, 需保证较高的V2I信道容量, 以支持带宽密集型应用。 K 个V2V链路在车辆之间形成, 设计需具有高可靠性, 使得周期性生成的安全消息可以在相邻车辆之间可靠地共享。

本文为单蜂窝覆盖下的车联网通信场景, 以基站为圆心, 半径为 R_c 。被覆盖的路段长度为 L , 路中心距离基站的距离为 D , 满足 $D^2 + (L/2)^2 = R_c^2$ 。

将V2I链路集合表示为 $M = \{1, 2, \dots, M\}$, V2V链路集合表示为 $K = \{1, 2, \dots, K\}$, 总带宽划分为资源块(Resource Block, RB) $F = \{1, 2, \dots, F\}$, 本文考虑V2V之间以及V2V与V2I之间的资源共享。为避免干扰信号对系统造成较大影响, 本文采用V2V直通链路复用V2I上行链路频谱资源的复用模式。当V2V直通链路复用V2I上行链路频谱资源时, 由第 m 个V2I链路的发射机通过第 f 个RB到基站的信道功率增益为 $g_{m,I}(f) = \alpha_{m,I}|h_{m,I}(f)|^2$, $h_{m,I}$ 为小尺度衰落分量, $\alpha_{m,I}$ 为路径损耗和阴影等大规模衰落效应。同理, 可以定义第 k 个V2V信道链路增益 g_k , 第 k 个V2V车辆与第 k' 个V2V车辆的干扰增益 $g_{k',k}$, 通过第 f 个RB从第 m 个V2I发射机到第 k 个V2V接收机的干扰信道 $g_{m,k}$, 通过第 k 个V2V接收机到基站的干扰信道 $g_{k,I}$ [15,16]。

V2I, V2V链路的信号干扰噪声比(Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)可表示为

$$\gamma_{m,f}^i = \frac{P_{m,f}^i g_{m,I}[f]}{\sigma^2 + \sum_k \mu_{k,f}^v P_{k,f}^v g_{k,B}[f]} \quad (1)$$

$$\gamma_{k,f}^v = \frac{P_{k,f}^v g_k[f]}{\sigma^2 + \sum_{m,k' \neq k} (\mu_{k',f}^v P_{k',f}^v g_{k',k}[f] + \mu_{m,f}^i P_{m,f}^i g_{m,k}[f])} \quad (2)$$

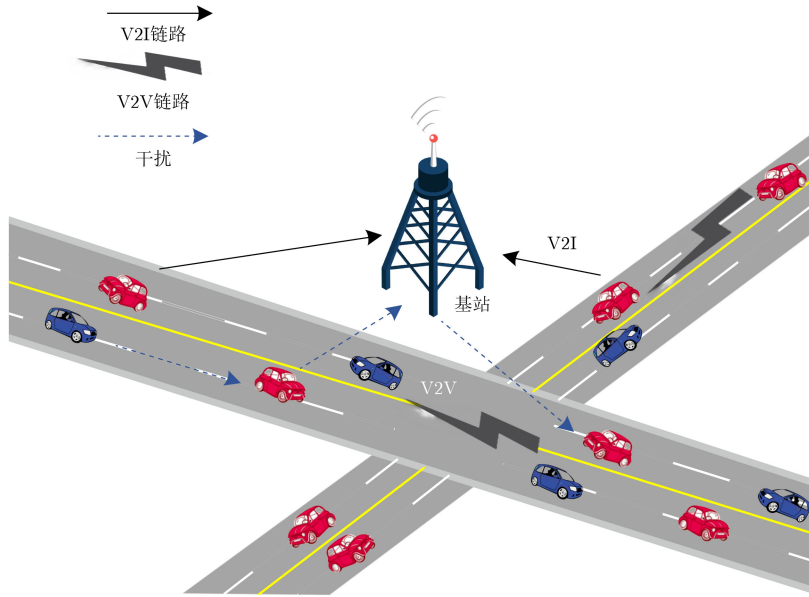


图1 高速公路场景下的车辆通信

$P_{k,f}^v$ 代表发射功率, σ^2 为噪声功率, $\mu_{m,f}^i \in (0, 1)$, 当 $\mu_{m,f}^i = 1$ 时表示V2I在通过第 f 个RB进行传输, 由于车辆的快速移动, 精确的信道状态信息(Channel State Information, CSI)不易获取, 本文只考虑大尺度的衰落和路径损耗。为了V2V的高可靠性, 设定阈值 p_0 , 为了实现高频谱利用率, V2I链路使用上行的正交频谱进行通信与V2V进行链路共享, V2I链路、V2V链路可访问多个RB。

2.2 问题建模

本文的研究目标是针对密集环境下V2V用户复用V2I上行链路资源, 考虑车辆网络的服务异构性, 构建以最大化V2I信道容量为目标的资源分配问题, 并充分考虑V2V用户的可靠性、车辆移动性、信令开销、功率控制等限制条件, 最后的问题被建模为

$$\begin{aligned}
 & \max_{\substack{\{\mu_{m,f}^i, \mu_{k,f}^v\} \\ \{P_{m,f}^i, P_{m,f}^v\}}} \sum_m \sum_f \mu_{m,f}^i \log_2(1 + \gamma_{m,f}^i) \\
 \text{C1: } & \text{s.t. } \mu_{k,f}^v \Pr\{\gamma_{k,f}^v \leq \gamma_0^v\} \leq p_0, \forall k, f \\
 \text{C2: } & \sum_m \mu_{m,f}^i = 1, \forall f \\
 \text{C3: } & \sum_f \mu_{m,f}^i \leq F, \sum_f \mu_{k,f}^v \leq F, \forall m, k \\
 \text{C4: } & \mu_{m,f}^i, \mu_{k,f}^v \in \{0, 1\}, \forall m, k, f \\
 \text{C5: } & \sum_f \mu_{m,f}^i P_{m,f}^i \leq P_{\max}^i, \sum_f \mu_{k,f}^v P_{k,f}^v \leq P_{\max}^v, \forall m, k \\
 \text{C6: } & P_{m,f}^i \geq 0, P_{k,f}^v \geq 0, \forall m, k, f
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, γ_0 是建立可靠的V2V链路所需的最小SINR, p_0 是中断阈值。 P_{\max}^i 和 P_{\max}^v 分别是V2I和V2V发射机的最大发射功率。约束C1表示对V2V链路的最

小可靠性要求, 其中概率根据移动信道的随机快速衰落来评估。约束C2限制在V2I链路之间分配正交频谱。约束C3和C4模拟了之前的假设, 即V2I和V2V能够接入多个RB。约束C5和C6确保V2I和V2V链路的发射功率不能超过最大的功率限制。

3 资源分配算法

V2I信道容量和V2V可靠性的优化问题本质上是组合问题, 针对此问题提出了基于超图理论和优化工具结合的求解算法, 在此基础上结合遗传算法提出性能显著提高的改进算法, 根据相应算法进行资源分配。

3.1 基于超图理论的资源分配

文献[6]联合二分图和匈牙利匹配算法, 解决了单一RB的共享问题。然而, 二分图只允许1条边连接两个顶点, 不适用于V2V链路复用多条V2I链路, 接入多个RB进行安全消息传输的情况, 难以达到遍历最优组合的性能。因此, 本文提出基于超图-遗传的资源分配机制, 首先根据干扰情况对V2V进行分簇, 以减少干扰保证通信的可靠性, 找到了适用于频谱共享的V2V集。在对V2V集群进行分簇后, 对发射功率进行优化, 最后, 通过超图理论和遗传算法进行资源分配, 基于3维匹配理论进行建模, 寻找最优权重, 在保证一定的V2V通信可靠性的前提下, 实现V2I信道容量最大化。

3.1.1 V2V分簇

在密集环境的V2V通信网络下, 车辆之间的干扰增大, 无线资源的调度也相对复杂, 对车辆进行分簇管理十分必要。根据车联网用户的运行条件, 基站覆盖范围为500 m, 根据道路与基站的距离对

路段进行均匀划分^[17], 文献^[17]指出, 同一簇内信道较好的用户会受到簇内信道较差用户的干扰, 系统的性能与用户之间的信道差异性呈正相关, 信道增益差异越大, 系统容量越大, 在提升系统容量的同时, 减少用户之间的干扰, 而车辆用户与基站的距离影响了信道条件的好坏, 所以按照与基站的距离分为核心区、中间区和边缘区, 核心区的车联网用户根据信道条件降序进行排序 $\{1, 2, \dots, C\}$, 根据核心用户车辆数分为 C 簇, 每个用户都作为各个簇的簇头, 边缘用户同样以降序排列。中间路段信道条件好的车联网用户和核心用户的信道增益差异小, 中间路段信道条件差的车联网用户和边缘用户的信道增益差异小, 保证中间用户信道差异性能获得最大的系统容量, 引入信道差异值 $\varphi = \sum_{q=1}^C ||h_{q+1}| - |h_q||$, 将中间用户进行遍历分簇, 寻找最大差异值一组作为最优的分簇结果, 为了保证不出现信道差异值相同的情况, 当信道差异值相同的簇出现之后, 对簇内所有用户的信道增益进行信道差异值计算, 差异值最大的一组作为最优用户分组, 最终得到 C 个用户组, 组内成员数量不一定相同。

3.1.2 功率分配设计

V2V链路可以与某个V2I链路共享频谱, 不同集群的V2V链路不允许共享, 当第 m 个V2I链路通过第 f 个资源块传输时, 第 k 个簇中的所有V2V共享该资源块, 为V2I和V2V链路找到最佳发射功率, 能有效减少干扰问题, 提升V2I信道容量。根据上行链路的基本原理, 假定V2V用户1和用户2形成一个簇, 并且用户1的信道条件要好于用户2, 则用户1和用户2的传输速率分别为

$$R_{k_1} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{k_1,f}^v g_{k_1}[f]}{\sigma + P_{k_2,f}^v g_{k_2}[f]} \right) \quad (4)$$

$$R_{k_2} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{k_2,f}^v g_{k_2}[f]}{\sigma} \right) \quad (5)$$

其中, $P_{k_1,f}^v$ 和 $P_{k_2,f}^v$ 代表V2V用户1和用户2的发射功率, σ 表示白噪声。根据功率预分配的方法进行车联网用户发射功率分配, 引入分配因子 $\xi_1 = P_{k_1,f}^v / P_{\max}^v$, $\xi_2 = P_{k_2,f}^v / P_{\max}^v$, 其中 $\xi_1 + \xi_2 = 1$, 功率优化问题为

$$\max \log_2 \left(1 + \frac{P_{\max}^v \xi_1 g_{k_1}[f] + P_{\max}^v \xi_2 g_{k_2}[f]}{\sigma} \right) \triangleq R_{m,n}[f] \quad (6)$$

$$\max \log_2 \left(1 + \frac{P_{\max}^v \xi_2 (g_{k_2}[f] - g_{k_1}[f]) + P_{\max}^v \xi_1 g_{k_1}[f]}{\sigma} \right) \triangleq R_{m,n}[f] \quad (7)$$

由于 $g_{k_1}[f] > g_{k_2}[f]$, 为了保证V2I的信道容量最

大^[17], 需要增加 ξ_1 减小 ξ_2 , 但是为了保证V2V用户的正常通信, 信道差的用户也需要分配相当的功率, 否则会由于功率过小而造成通信中断, 无法保证一定的通信可靠性。所以需要在保证V2V用户正常通信的前提下, 尽量减少 ξ_2 的功率分配因子, 使得V2V用户在保证一定可靠性的前提下, V2I获得更大的通信功率分配, 提升系统总容量。为了保证V2V用户的正常通信, 设定其最小信息传递概率为 R_{2st} , 需满足

$$R_{k_2} \geq R_{2st} \quad (8)$$

同时, 当V2I的通信速率等于最小通信阈值时, 系统的容量能够获得最大值。此时系统的容量获得最大值, 而功率分配因子的上下限为

$$\frac{\sigma(2^{R_{2st}} - 1)}{P_{\max}^v g_{k_2}} \leq \xi_2 \leq \frac{g_{k_1} - \eta}{g_{k_1} + g_{k_2}} \quad (9)$$

当用户的功率值在此范围时能够实现用户总容量的增加, 阈值上限保证不同用户之间信息传输存在差异性, 阈值下限保证用户能够正常通信, 若用户的目标接收速率取值不合适, 用户可能会处于中断状态。目标函数会随着V2V发射功率的降低而单调增加, 可以通过降低 $P_{k,f}^v$ 来改善, 令

$$T \triangleq \frac{P_{k,f}^v g_k[f]}{\sigma^2 + \sum_{m,k' \neq k} (\mu_{k',f}^v P_{k',f}^v g_{k',k}[f] + \mu_{m,f}^i P_{m,f}^i g_{m,k}[f])} \quad (10)$$

为简化符号表示, 省略符号 f , 可以得到

$$T' = \frac{P_k^v g_k}{\sigma^2 + \sum_{m,k' \neq k} (\mu_{k',f}^v P_{k',f}^v g_{k',k} + \mu_m^i P_m^i g_{m,k})} < \frac{P_k^v g_k}{\sigma^2 + P_m^i g_{m,k}} = T'' \quad (11)$$

联合信道增益可得

$$\Pr \left\{ \frac{P_k^v \alpha_k |h_k|^2}{\sigma + P_m^i \alpha_{m,k} |h_{m,k}|^2} \leq \gamma_0^v \right\} = 1 - \frac{P_k^v \alpha_k e^{-\frac{\gamma_0^v \sigma^2}{P_k^v \alpha_k}}}{P_k^v \alpha_k + \gamma_0^v P_m^i \alpha_{m,k}} \leq p_0 \quad (12)$$

因此, 考虑最大功率约束后, 最优解为

$$P_m^i = \min \left\{ P_{\max}^i, \frac{\alpha_k}{\gamma_0^v \alpha_{m,k}} \left(\frac{e^{-\frac{\gamma_0^v \sigma^2}{P_k^v \alpha_k}}}{1 - p_0} - 1 \right) \right\} \quad (13)$$

$$P_m^v = \frac{\sigma(2^{R_{2st}} - 1)}{g_{k_2}} \quad (14)$$

3.1.3 资源分配

资源分配问题涉及到3个集合之间的匹配，可以通过3维匹配进行建模，如图2所示。

M 代表V2I链路， F 代表待分配资源块， K 代表分簇后的V2V簇，对与每一种可能的资源共享模式，通过设定一定的中断概率保证V2V一定的通信可靠性，并最大化V2I的信道容量。与文献[15]类似，解决V2I-RB-V2V资源分配问题相当于用权函数去解决 $H = (V, E)$ 的3维匹配问题， E 是 V 的非空子集，所以 $\forall e_1, e_2 \in M_0 \subseteq E, e_1 \cap e_2 = \emptyset$ ，资源匹配问题转化为找到相应的 M_0 使权重函数最大^[15]

$$\left. \begin{aligned} w(m, f, k) &= R_m[f] \\ 1 \leq m &\leq M \\ 1 \leq f &\leq F \\ 1 \leq k &\leq K \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

在本文的问题中首先建立一个3部分超图 $H = (V, E)$, V, E 分别满足

$$V = \{[m, 0, 0] : 1 \leq m \leq M\} \cup \{[0, f, 0] : 1 \leq f \leq F\} \cup \{[0, 0, k] : 1 \leq k \leq K\} \quad (16)$$

$$E = \{[m, f, k] : 1 \leq m \leq M, 1 \leq f \leq F, 1 \leq k \leq K\} \quad (17)$$

$$(m, f, k) = \{[m, 0, 0], [0, f, 0], [0, 0, k]\} \quad (18)$$

3维匹配算法首先找到相互独立的超边作为可行解，通过不断寻找使匹配结果中超边的权重和增加的 M_0 ，并将其与已经在匹配结果中的中心点进行交换最后得到资源分配的结果，使V2I的信道容量最大化。

综上，可以通过3维匹配算法利用求取权重的方法来进行资源匹配。本文将使用有效的算法来近似解决3维匹配问题，来保证近似解接近最优。

3.2 超图—遗传算法

基于上述超图理论资源分配，本文将引入遗传算法与之结合，进一步提升了系统的性能，下面主要介绍一下相应的问题设置和遗传算法的优势。遗传算法通过模拟自然进化过程中的染色体基因的交叉变异等过程搜索最优解。

本文的基本思想是首先根据V2V簇群的特点估计出最优解可能分布的范围，然后随机地在该范围内生成初始化种群，对分簇后的V2V链路进行寻优，决定要加入的最优集群，适应度函数即为V2I的链路容量，不断重复此过程，直到收敛或达到迭代次数。

3.2.1 产生初始种群和基因编码

在选定的范围有 t 个V2V簇，可表示为 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_t\}$ ，种群个体的染色体可以表示为 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_t\}$ ，即每个个体都是由 t 个基因组成，其中的元素对应着V2V簇。种群由若干个体组成的，是V2V簇选取方案的集合，种群中的某个个体是一种方案，个体的染色体是该方案下簇的集合。

3.2.2 适应度函数的设定

适应度函数判断每个V2V簇在遗传优化、变异的过程中是否有可能是最优解或者对最优解的搜寻有帮助，适应度高的V2V簇能遗传到下一代的概率就高，不能够遗传下去的就会被淘汰。定义适应度函数 $g(t)$ ，利用遗传算法寻优使得找到对应的 t 使得 $g(t)$ 最大。上文提到将V2V链路，对V2V链路进行分簇，最终的目标是求得V2I链路的最大容量，则适应度函数对应于公式

$$g(t) = \sum_m \sum_f \rho_{m,f}^i \log_2(1 + \gamma_{m,f}^i) \quad (19)$$

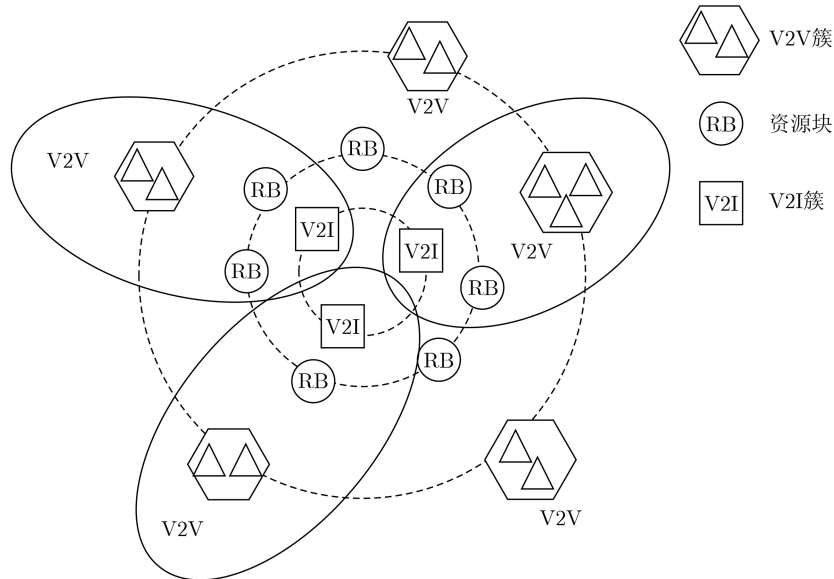


图2 V2I与V2V之间频谱共享

最大化V2I容量的问题被转化为寻找 t 使得给 $g(t)$ 最大。

3.2.3 选择、交叉、变异的实现

选择操作是为了在V2V簇中选出更有意义的个体保留下来, 选用冒泡排序将适应度函数值更高的簇保留下来作为下一代的种群, 干扰更小的簇群更有可能被遗传到下一代。交叉操作对父代V2V簇进行重组, 挑选若干个体将其不同地方的基因随机进行交叉变换, 形成全新的基因组合。变异操作是在簇群中随机选择若干V2V簇, 以一定的变异概率随机更改个体中的某些基因值, 为新个体提供了机会, 可以避免陷入局部最优。

4 仿真结果

在这一部分, 给出了仿真结果来验证所提出的基于超图理论和遗传算法的车载网络的频谱和功率分配算法。本文对单个小区的多车道公路进行建模, 基站位于公路中心, 如图1所示。车辆按照空间泊松过程降落在道路上, 车辆密度由车速决定。在生成的车辆中随机选择 m 个V2I链路, k 个V2V链路, 表1、表2列出了主要仿真参数。

图3为不同算法实现的瞬时V2I链路容量的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。由图3可知本文提出的算法在V2I总容量上优于启发式基准CROWN算法, 贪婪算法、以及文献[15]提出的改进版的贪婪算法。在贪婪算法中, 将正交的资源块随机分给V2I链路, 然后利用终端在基站链路的CSI, 通过贪婪算法进行寻优, 将RB分配给信道条件最好的用户, 贪婪算法只能做出当下最优的选择, 难以做到整体信道容量和最优。文献[13]提出的启发式基准CROWN算法, 将正交的RB分配给V2I链路, 并要求BS端获得快速衰落CSI, 导致了大量的信令开销。本文首先将对V2V链路进行分簇, 减少簇内的干扰, 本文提出的算法资源分配更加灵活, 提高了V2I链路的信道容量。本文实现了显著的性能改善, V2I的容量提升了6.48%, 代价是进一步调整V2V聚类 and 资源分配的复杂性。

图4显示了V2V链路的可靠性, 其中绘出了任意V2V链路的瞬时SINR的CDF。从图4可以看出, 在目标中断概率 $p_0=0.01$ 时, 所有提出的算法都达到了SINR阈值 $\gamma_{d_0}=5$ dB, 证明了所提出的资源分配方案在密集环境下保证可靠性的有效性。此外, 达到SINR阈值的结果准确地验证了中断上限的严密性, 用于促进功率控制设计的推导。图5评估了具有不同目标中断概率的任意V2V的接收SINR的累积分布函数。每个用户设备的期望SINR阈值

是5 dB。从图5可以看出, 该算法准确地满足了SINR中断概率的可靠性约束, 证明了超图-遗传算法的有效性。

图6显示了随着车速的增加, 本文算法与超图算法的V2I信道容量之和。观察到两种算法的V2I信道容量之和随着车速的增加而减少。这是因为不断增长的车速会导致公路上的交通更加稀疏。这里, 为了保证V2V链路的可靠性, 需要增加V2V发射功率来补偿V2V信号信道的较高路径损

表1 模拟参数

参数	数值
载频	2 GHz
带宽	10 MHz
基站天线高度	25 m
基站天线增益	8 dBi
基站噪声	5 dB
公路距离基站的距离	35 m
车载天线高度	1.5 m
车载天线增益	3 dBi
车辆噪声	9 dB
车速	90 km/h
V2I链路数量	10
V2V链路数量	30
最大的V2I发射功率	23 dBm
最大的V2V发射功率	23 dBm
噪声功率	-114 dBm

表2 V2I和V2V链路的信道模型

	V2I链路	V2V链路
路径损耗模型	$128.1+37.6\lg d$	(Line Of Sight, LOS) WINNER+B1
阴影分布	正态对数	正态对数
阴影标准偏差	8 dB	3 dB
快衰落	瑞利衰落	瑞利衰落

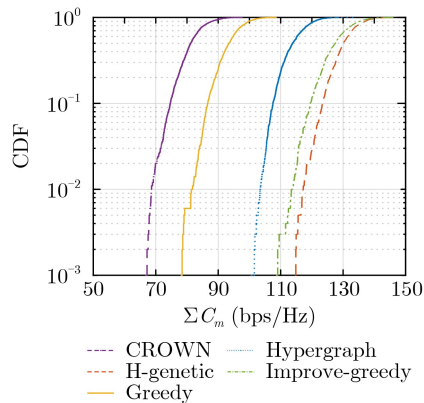


图3 V2I瞬时容量和的CDF

耗，同时，V2V接收机可以容忍来自V2I发射机的较少干扰。因此，V2I链路的最大允许发射功率将受到限制来自V2V链路的更多干扰朝着V2I链路产生，V2I链路的信道容量将因此降低。从图6中，注意到两种的总V2I容量减少在车辆速度增长中近似线性，即车辆速度对总V2I容量大致具有一致的影响。此外，车辆链路的最大发射功率从17 dBm增加到23 dBm，提高了总V2I容量，并且这种信道容量提高相对于车辆速度也大致相同。

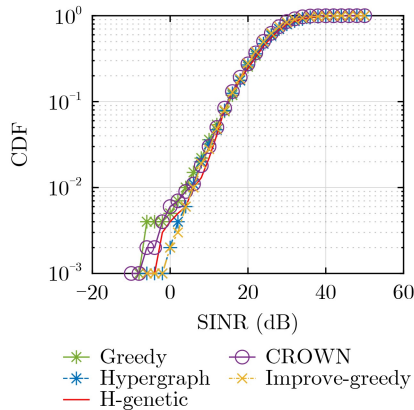


图4 V2V链路的瞬时SINR的CDF

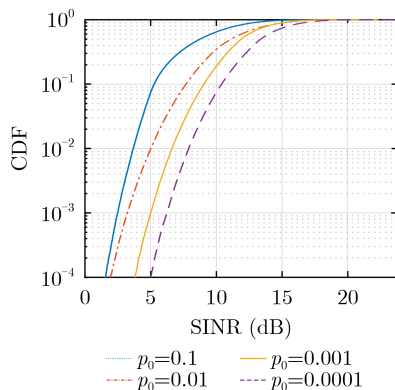


图5 超图算法下不同中断概率的V2V的瞬时SINR的CDF

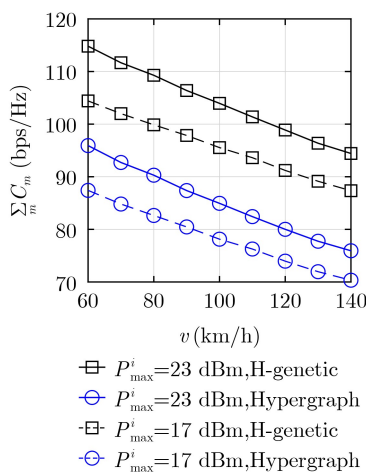


图6 速度变化时的V2I总容量

5 结论

本文考虑了支持V2V通信的蜂窝车联网覆盖的密集场景下，针对于V2V用户的可靠性需求，以及V2I用户的信道容量需求，利用超图-遗传理论的3维匹配算法进行频谱资源分配和功率分配，在保证V2V可靠性的前提下，提高了V2I的信道容量，最后的仿真结果证明，本文算法可以在保证车辆用户可靠性的前提下，提升V2I的信道容量。

参考文献

- [1] SINGH A and SINGH B. A study of the IEEE802.11p (WAVE) and LTE-V2V technologies for vehicular communication[C]. 2020 International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management, Dubai, United Arab Emirates, 2020: 157–160. doi: [10.1109/ICCAKM46823.2020.9051468](https://doi.org/10.1109/ICCAKM46823.2020.9051468).
- [2] HE Wenxue, LI Huaifu, ZHI Xiao, *et al.* Overview of V2V and V2I wireless communication for cooperative vehicle infrastructure systems[C]. The 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, Chengdu, China, 2019: 127–134. doi: [10.1109/IAEAC47372.2019.8997786](https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997786).
- [3] LI Yibing, NIU Chongyu, and YE Fang. Graph-based femtocell enhanced universal resource allocation strategy for LTE-A HetNets[C]. 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall, Singapore, 2017: 3073–3078. doi: [10.1109/PIERS-FALL.2017.8293662](https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293662).
- [4] XIAO Shuang, LI Wenzao, YANG Lingling, *et al.* Graph-coloring based spectrum sharing for V2V communication[C]. 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies, Glasgow, UK, 2020: 1–4. doi: [10.1109/UCET51115.2020.9205455](https://doi.org/10.1109/UCET51115.2020.9205455).
- [5] SUN Wanlu, YUAN Di, STRÖM E G, *et al.* Cluster-based radio resource management for D2D-supported safety-critical V2X communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(4): 2756–2769. doi: [10.1109/TWC.2015.2509978](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2509978).
- [6] LEANH T, TRAN N H, SAAD W, *et al.* Matching theory for distributed user association and resource allocation in cognitive femtocell networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 8413–8428. doi: [10.1109/TVT.2017.2689795](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2689795).
- [7] ZENG Bin and YAO Lu. Traffic Patten based resource allocation algorithm for hybrid transmission in LTE networks[C]. The 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, Chongqing, China, 2017: 81–85. doi: [10.1109/ITOEC.2017.8122384](https://doi.org/10.1109/ITOEC.2017.8122384).
- [8] 钱志鸿, 阎双叶, 田春生, 等. LTE-A网络中D2D通信的资源分配算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(10): 2287–2293.

- doi: [10.11999/JEIT180043](https://doi.org/10.11999/JEIT180043).
- QIAN Zhihong, YAN Shuangye, TIAN Chunsheng, *et al.* Research on resource allocation algorithm for D2D communications underlying LTE-A networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(10): 2287–2293. doi: [10.11999/JEIT180043](https://doi.org/10.11999/JEIT180043).
- [9] WEI Qing, SUN Wanlu, BAI Bo, *et al.* Resource allocation for V2X communications: A local search based 3D matching approach[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7996984](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996984).
- [10] FAN Cong, LI Changle, ZHANG Yao, *et al.* Resource allocation for platoon oriented vehicular communications: A neural network approach[C]. 2021 IEEE International Conference on Communications, Montreal, Canada, 2021: 1–6. doi: [10.1109/ICC42927.2021.9500878](https://doi.org/10.1109/ICC42927.2021.9500878).
- [11] LUO Quyuan, LI Changle, LUAN T H, *et al.* Optimal utility of vehicles in LTE-V scenario: An immune clone-based spectrum allocation approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(5): 1942–1953. doi: [10.1109/TITS.2018.2850311](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2850311).
- [12] 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, Bologna, Italy, 2017: 396–401. doi: [10.1109/ISWCS.2017.8108147](https://doi.org/10.1109/ISWCS.2017.8108147).
- [13] YANG Jiabin, PELLETIER B, and CHAMPAGNE B. Enhanced autonomous resource selection for LTE-based V2V communication[C]. 2016 IEEE Vehicular Networking Conference, Columbus, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/VNC.2016.7835937](https://doi.org/10.1109/VNC.2016.7835937).
- [14] WANG Baoji, ZHANG Rongqing, CHEN Chen, *et al.* Interference hypergraph-based 3D matching resource allocation protocol for NOMA-V2X networks[C]. 2019 IEEE International Conference on Communications, Shanghai, China, 2019: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2019.8761579](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761579).
- [15] LIANG Le, XIE Shijie, LI G Y, *et al.* Graph-based resource sharing in vehicular communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(7): 4579–4592. doi: [10.1109/TWC.2018.2827958](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2827958).
- [16] LIANG Le, KIM J, JHA S C, *et al.* Spectrum and power allocation for vehicular communications with delayed CSI feedback[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(4): 458–461. doi: [10.1109/LWC.2017.2702747](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2702747).
- [17] 程前. 基于NOMA的车联网V2X功率控制研究[D]. [硕士学位论文], 北方工业大学, 2021.
- CHENG Qian. Research on V2X power control of vehicle networking based on NOMA[D]. [Master dissertation], North China University of Technology, 2021.
- 李一兵: 男, 教授, 研究方向为通信信号处理、无线电导航与定位.
- 王宁馨: 女, 硕士生, 研究方向为车联网资源分配.
- 吕威: 男, 高级工程师, 研究方向为产业互联网.
- 责任编辑: 余蓉