

5G 蜂窝车联网 (C-V2X) 资源分配优化与性能评估

洪莹¹, 沙宇晨¹, 丁飞^{*1,2}, 陈竺¹, 张登银^{1,2}

(1. 南京邮电大学 江苏省宽带无线通信和物联网重点实验室, 南京 210003, 中国;
2. 南京邮电大学 通信与网络技术国家工程研究中心, 南京 210003, 中国)

摘要: 为改善蜂窝车联网 (C-V2X) 频谱利用效率, 提出了一种针对系统下行吞吐量最大化、并保证车对车通讯 (V2V) 链路连接性的资源分配算法。定义蜂窝车联网信道模型, 在最大发射功率、中断概率等约束条件下建立优化模型并对其进行分步求解, 采用二分图最佳匹配 (KM) 算法动态调度信道资源, 实现 C-V2X 通信系统中车辆到路边设施 (V2I) 下行链路与 V2V 链路之间动态分配网络资源, 最后通过不同交通场景评估算法的优化性能。结果表明: 本算法经 7 次迭代后进入稳态, 在保证 V2V 链路连接性条件下实现了 V2I 链路资源的优化分配, 下行链路频谱效率相较于贪心算法平均提升 3.5% 以上。

关键词: 智慧交通; 蜂窝车联网 (C-V2X); V2X 通信; 车对车通讯 (V2V); 资源分配; 吞吐量

中图分类号: TN 919.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2023.03.010

Resource allocation optimization and performance evaluation for 5G cellular vehicle-to-everything (C-V2X)

HONG Ying¹, SHA Yuchen¹, DING Fei^{*1,2}, CHEN Zhu¹, ZHANG Dengyin^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. National Local Joint Engineering Research Center for Communication and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: To improve the spectrum utilization efficiency of C-V2X (cellular vehicle to everything), a resource allocation algorithm was proposed to maximize system downlink throughput and ensure the connectivity of the V2V (vehicle to vehicle) communication. A channel model of cellular vehicle to everything was defined, the optimization model was established under the constraints of maximum transmission power, outage probability, etc., and was solved step by step. The KM (Kuhn-Munkras) algorithm was used to dynamically schedule channel resources to realize the dynamic allocation of network resources between the V2I (vehicle to infrastructure) downlink and the V2V link in the C-V2X communication system. The optimization performance of the algorithm was evaluated through different traffic scenarios. The results show that the proposed algorithm enters a steady

收稿日期 / Received : 2023-01-28。 修回日期 / Revised : 2023-03-06。

基金项目 / Supported by : 工业和信息化部产业技术基础公共服务平台项目(2019-00892-3-1); 江苏省产业前瞻与关键核心技术(重点项目)(BE2019004-3); 江苏省研究生科研创新计划(KYCX23_1054, KYCX23_1058)。

第一作者 / First author : 洪莹(1999—), 女(汉), 湖北, 硕士研究生。E-mail: 2893725331@qq.com。

第二作者 / Second author : 沙宇晨(1996—), 女(汉), 江苏, 博士研究生。E-mail: 554320330@qq.com。

* 通讯作者 / Corresponding author : 丁飞, 副教授。E-mail : dingfei@njupt.edu.cn。

state after seven iterations, achieves the optimal allocation of V2I link resources while ensuring the connectivity of V2V links, and the downlink spectrum efficiency increased by an average of more than 3.5% compared to the greedy algorithm.

Key words: intelligent transportation; vehicle-to-everything (V2X); cellular-V2X (C-V2X); resource allocation; throughput

第 5 代移动通信系统 (5th generation mobile communication system, 5G) 的迅猛发展给车联网带来了重大发展机遇, 5G 与车联网的融合推动了城市道路基础设施的升级部署以及智能网联车路云协同系统的建设^[1]。蜂窝车联网 (cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 通信技术从长期演进 (long term evolution, LTE) 平滑演进到 5G, 利用 5G 网络的高速率和低时延优势可显著提高智能网联车辆的通信与服务性能^[2]。一方面, 基于 C-V2X 技术, 智能网联车辆具备与周围车辆以及道路相互通信的能力, 这一能力使得智能网联车辆在跟驰和换道等过程中获得更多信息, 有助于生成更加灵活、智能的决策^[3]; 另一方面, 车到车 (vehicle to vehicle, V2V)、车到路 (路侧设施) (vehicles-to infrastructure, V2I)、车到人 (vehicle to pedestrian, V2P) 和车到云 (vehicle to cloud, V-C) 多种组网模式的混合运用, 有益补充了智能网联交通下人、车、路、云的服务场景^[4]。

然而, 智能网联车辆大数量并发连接并入网运行, 车辆高速移动和 V2X 组网加剧网络拓扑和信道动态变化, 造成车联网组网性能无法获得保证^[5]。在大规模 5G 蜂窝车联网中, 传统的蜂窝网络资源管理手段已难以满足动态变化的车联网用户需求^[6]。研究如何在高速变化的车联网拓扑网络中进行高效的车联网资源分配管理, 对于保障车联网通信与服务性能, 以及为后期车联网实际部署与管理奠定坚实基础且具有实际意义^[7-8]。

为了缓解蜂窝车联网有限频谱资源与海量用户业务匹配需求的紧张矛盾, 已有众多研究者致力于资源分配优化方面研究。针对高移动性车辆环境导致车联网网络拓扑和信道快速变化, 使得蜂窝网络无法收集准确的瞬时信道状态信息用于集中资源管理。文献 [9] 构建了基于车辆运动特征的时变模型, 以支撑评估交叉口车辆排队通信的动态连接性能。文献 [10] 提出了一种基于多任务强化学习算法来优化资源分配和频谱共享问题, 将资源共享建模为多智能体强化学习问题, 通过适当的奖励设计和训练机制更新 Q 网络以学习改善频谱和功率分配, 有效提高 V2V 链路的有效载荷交

付率和 V2I 链路的总容量。为满足智能网联车辆对数据流量日益增长的需求, 文献 [11] 提出了一种基于混沌—灰狼优化算法的 V2X 功率控制和无线信道分配策略, 综合考虑 V2V 链路的时延约束和 V2I 链路的公平性约束等服务质量 (quality of service, QoS) 指标, 在实现蜂窝车联网资源分配的同时, 提升了系统吞吐量。

文献 [12] 将最大功率分配和最佳功率分配机制用于 V2V 链路的传输节点的功率分配环节, 通过深度优先搜索树算法建立最优功率策略, 可以最大限度的提高整体网络资源的利用率。针对大量车联网业务造成的数据拥塞问题, 文献 [13] 构建了 V2X 协同缓存与资源分配架构, 引入了拉格朗日乘子法对 V2X 系统的功率与计算资源进行联合优化。在进行 V2X 资源分配时, 如果不能充分考虑蜂窝车联网动态复杂环境下的信道衰落影响, 会造成无线资源分配的不合理, 为此文献 [14] 评估和对比分析了蜂窝车联网系统中无线信道受到的大尺度和小尺度衰落对资源分配造成的不同影响。当多个用户共用同一时频资源进行数据传输时会产生一定的相互干扰, 设计有效的功率分配策略可缓解信道传输效能。文献 [15] 基于最大化用户的可达速率, 设计了 2 种非正交多址 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 中继辅助传输方案, 但由于系统遍历等问题, 造成该方法的计算复杂度较高。文献 [16] 在车辆边缘计算 (vehicular edge computing, VEC) 架构下, 纳入了随机任务到达与信道变化等车载动态环境因素, 通过构建的分离式深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 框架来生成功率分配优化策略, 相比传统集中式 DRL 框架具有更好的功耗和延迟服务性能。上述研究主要采用模型驱动方法对蜂窝车联网资源进行优化并取得了较好的研究进展, 但在模型设计时通常需要自定义学习率和损失函数等参数, 且需要找出不同训练条件下的迭代运算优化值, 当蜂窝车联网车辆规模和并发业务量增加时, 为满足蜂窝车联网网络资源细粒度精确配置需求时, 对应模型的待优化变量呈指数级增长, 从而影响到系统的执行效率。

本文研究 5G 蜂窝车联网 V2X 资源分配优化问题,

在实时感知信道状态条件下应用启发式图优化方法设计蜂窝车联网资源分配算法,满足 V2I 下行吞吐量最大化并保证 V2V 链路的连接性要求。在蜂窝车联网 V2X 组网环境下,算法综合考虑 V2I 链路的吞吐率和 V2V 链路的可靠连接性需求,以提出满足 V2X 系统中 V2I 下行链路的吞吐量和 V2V 链路可靠性的优化模型,通过动态的功率分配以提高蜂窝车联网 V2X 通信系统的组网服务性能。优化目标是在最大发射功率、中断概率等约束条件下使系统下行的吞吐量最大化,通过 KM (Kuhn Munkras) 算法对链路功率进行优化分配,最大限度地保障 V2V 链路的可靠性用检验仿真结果检验该算法的性能。

1 系统模型

1.1 网络模型

蜂窝车联网 C-V2X 组网模型如图 1 所示。

路侧单元 (road side unit, RSU)、信号灯控制器、道路视频录像机等路侧设施部署于区域边缘云服务器。V2I 链路旨在支持蜂窝下行 V2I 数据服务, V2V 链路负责传输可靠的周期性安全消息, 上述信息会根据车辆的移动性以不同的周期频率生成, 应用于高级驾驶服务。

路侧单元 (RSU) 负责收集车辆终端设备和 V2X 交互信息, 从全局视野感知 V2X 组网过程中的通信状态信息。假设 RSU 覆盖范围为 200 m, 该 C-V2X 网络系统存在 K 个 V2V 链路和 M 个 V2I 链路, 将 V2V 链路的集合记作 $K = \{1, 2, \dots, k\}$, V2I 链路的集合记作 $M = \{1, 2, \dots, m\}$, 每个 V2X 组网链路的收发端均配置一根全向天线。

为了提高频谱利用率, V2I 正交分配的下行频谱被 V2V 复用。第 m 个 V2I 链路和 RSU 之间的信道功率增益表示为

$$g_{m,R} = \alpha_{m,R} |h_{m,R}|. \quad (1)$$

其中: $h_{m,R}$ 为频率相关的小尺度衰落成分, 其服从单位均值的指数分布; $\alpha_{m,R}$ 为大尺度衰落成分, 由路径损耗

和阴影衰落叠加组成^[13]。

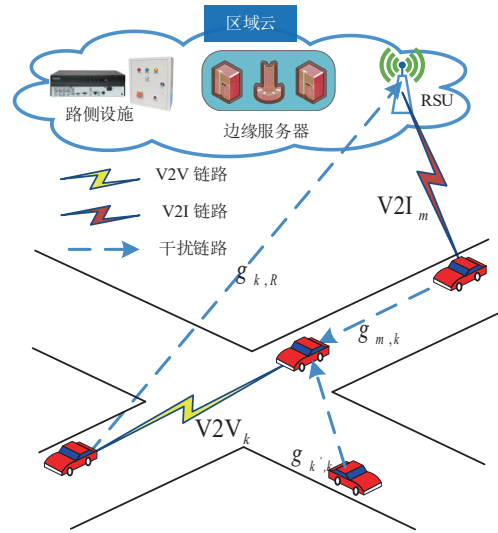


图 1 C-V2X 通信网络架构

1.2 基于直连通信的信道模型

第 3 代合作伙伴计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) 协议为 V2V 信道模型定义了 3 类传播场景^[17-18], 分别是视距 (line of sight, LOS)、非视距 (not line of sight, NLOS) 以及车辆间非视距 (not line of sight due to vehicles, NLOSv), 如图 2 所示。

视距 LOS 条件下, 无线信号无遮挡地在发射机与接收机之间直线传播; NLOS 为发射机和接收机之间受到障碍物的遮挡, 发射机传输的信号需通过折射、反射、散射以及衍射, 从而到达接收机。根据智能网联车辆在高速公路和城区等不同交通场景下的行驶环境, 分别构建 V2V 信道模型对信号发生的衰减与干扰进行模拟, 以准确评估智能网联车辆 V2X 资源分配算法的可行性。

根据 3GPP TR 37.885^[19] 标准, 高速公路场景 LOS、NLOSv 条件下的基于 PC5 接口的 V2V 通信的路径损耗模型为:

$$PL_{LOS} = 32.4 + 20 \lg(d_{2D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}). \quad (2)$$

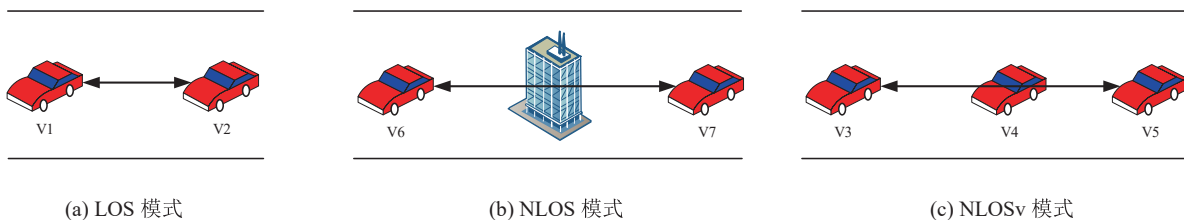


图 2 典型 V2V 信道传播模型

其中: d_{2D} 表示发射机和接收机之间的距离, f_c 表示载波频率。

对于城区交通场景, LOS 条件下的路径损耗模型为:

$$PL_{LOS} = 38.77 + 16.7 \lg(d_{2D}/m) + 18.2 \lg(f_c/\text{Hz}). \quad (3)$$

考虑到智能网联车辆的实际行驶过程中存在交叉路口、楼宇建筑物等非视距链路环境, 信号不能直接到达接收方, 定义 NLOS 条件下的路径损耗模型为:

$$PL_{LOS} = 36.85 + 30 \lg(d_{2D}/m) + 18.9 \lg(f_c/\text{Hz}). \quad (4)$$

1.3 基于 Uu 接口的信道模型

智能网联车辆装配的车载单元 (on board unit, OBU) 与路侧单元 RSU 之间的通信服务模型如图 3 所示, 其中 h_{BS} 表示 RSU 天线的高度, h_{UT} 表示车辆 OBU 配置天线的高度, d_{3D} 表示 OBU 天线与 RSU 天线之间的 3D 距离。

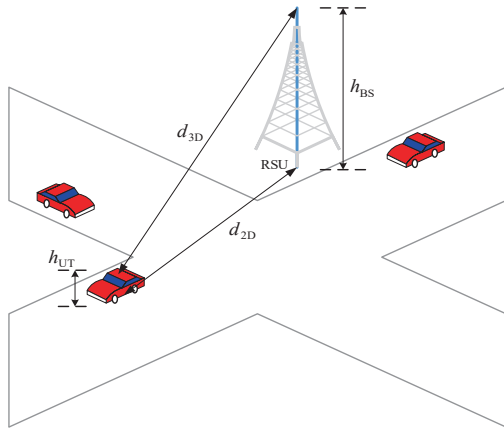


图 3 通信服务模型

1.3.1 LOS 信道模型

城区交通场景中, LOS 条件下的路径损耗模型为:

$$PL_{Uma} = \begin{cases} PL_1, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{BP}; \\ PL_2, & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}. \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{BP} = 4 h_{BS} h_{UT} f_c / c.$$

其中: d_{BP} 表示为断点距离, c 为光速。

当 $10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{BP}$ 时, 基于终端与接入网 (User equipment and UMTS terrestrial radio access network, Uu) 接口的 V2I 通信的路径损耗模型为:

$$PL_1 = 28 + 22 \lg(d_{3D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}). \quad (6)$$

当 $d_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$ 时, 基于 Uu 接口的 V2I 通信的路径损耗模型为:

$$PL_2 = 28 + 40 \lg(d_{3D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}) - 9 \lg[(d_{BP}/m)^2 + (h_{BS}/m - h_{UT}/m)^2]. \quad (7)$$

高速公路场景中, LOS 视距条件下路径损耗模型定义为:

$$PL_H = \begin{cases} PL_3, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{BP}; \\ PL_4, & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}. \end{cases}$$

$$PL_3 = 32.4 + 21 \lg(d_{3D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}). \quad (8)$$

$$PL_4 = 32.4 + 40 \lg(d_{3D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}) - 9.5 \lg[(d_{BP}/m)^2 + (h_{BS}/m - h_{UT}/m)^2].$$

1.3.2 NLOS 信道模型

NLOS 条件下, 城区交通场景中, 当 $10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$ 时, 路径损耗模型为:

$$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-NLOS}, PL'_{UMa-NLOS}).$$

$$PL'_{UMa-NLOS} = 13.5 + 39.08 \lg(d_{3D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}) - 0.6(h_{UT} - 1.5) \quad (9)$$

当 $d_{2D} < 10 \text{ m}$ 或 $d_{2D} > 5 \text{ km}$ 时, 该模型为:

$$PL_{UMa-NLOS} = 32.4 + 30 \lg(d_{3D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}). \quad (10)$$

高速公路场景中, $10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$ 时, 路径损耗模型为:

$$PL_{H-NLOS} = \max(PL_{H-NLOS}, PL'_{H-NLOS}).$$

$$PL'_{H-NLOS} = 22.4 + 35.3 \lg(d_{3D}/m) + 21.3 \lg(f_c/\text{Hz}) - 0.3(h_{UT} - 1.5) \quad (11)$$

当 $d_{2D} < 10 \text{ m}$ 或 $d_{2D} > 5 \text{ km}$ 时, 该模型为:

$$PL_{H-NLOS} = 32.4 + 31.9 \lg(d_{3D}/m) + 20 \lg(f_c/\text{Hz}). \quad (12)$$

V2I 链路接收信道的信干噪比可表示为:

$$\text{SINR}_m = \frac{P_m g_{m,R}}{\sigma^2 + I_m} \quad (13)$$

V2V 链路接收信道的信干噪比可表示为:

$$\text{SINR}_k = \frac{P_k g_k}{\sigma^2 + I_k} \quad (14)$$

其中: P_m 、 P_k 分别表示 V2I 和 V2V 链路的发射功率, g_k 表示在第 k 个 V2V 信道和干扰信道之间的信道增益, σ^2 表示噪声功率, I_m 为 V2I 链路接收信道受到的干扰

功率, I_k 为 V2V 链路接收信道受到的干扰功率。

V2I 链路的信道容量可表示为:

$$C_m = W \lg(1 + \text{SINR}_m). \quad (15)$$

V2V 链路的信道容量可表示为:

$$C_k = W \lg(1 + \text{SINR}_k). \quad (16)$$

其中, W 为频谱带宽。

2 优化问题描述与算法

2.1 优化问题描述

蜂窝车联网 V2X 资源分配的目标是在动态、时变的 C-V2X 信道环境下, 考虑源节点的最大发射功率限制和目的节点的 QoS 约束, 在每个传输时隙对系统下行吞吐量和 V2V 链路的连接性进行联合优化。设计的目标函数如式 (17) 所示, 最大限度地保证每个 V2V 链路可靠组网的前提下, 以最大化 C-V2X 系统的下行链路的吞吐量。

$$\max \sum_m \lg(1 + \text{SINR}_m). \quad (17)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_m \leq P_{\max}, \forall m \in M; \quad (17a)$$

$$C_m \geq C_0; \quad (17b)$$

$$0 \leq P_k \leq P_{\max}, \forall k \in K; \quad (17c)$$

$$P\{\text{SINR}_k \leq \text{SINR}_0\} \leq p_0, \forall k \in K. \quad (17d)$$

其中: 约束 (17a) 表示 M 个 V2I 链路的发射功率都不能大于 V2I 链路的最大发射功率 P_{\max} 。约束 (17b) 表示每个 V2I 信道容量需要大于链路的最小限定吞吐量 C_0 。约束 (17c) 表示 K 个 V2V 链路的发射功率需要小于或等于 V2V 链路的最大发射功率 P_{\max} 。 p_0 表示链路可容忍的中断概率, 约束 (17d) 表示 K 个 V2V 链路的传输速率需小于或等于可容忍的中断概率, 即保证 V2V 链路的连接可靠性。

最大化系统下行的吞吐量 $\sum C_m$ 的优化问题是离散变量和连续变量并存的混合整数规划问题, 优化目标和约束条件是连续优化变量的非凸函数。为了在满足蜂窝车联网中不同链路的多样化需求, 即系统下行的吞吐量需求大、V2V 连接可靠性需求高的要求, 本文引入二分图最佳匹配 KM 算法对上述优化问题进行求解, 将 V2I 链路总容量的优化问题转化为求带权二分图的链路信道资源的最佳匹配问题。

2.2 算法描述

基于带权二分图 KM 算法以加权二分图为基础, 通过寻找增广路径得到最大权值的最佳匹配^[20]。V2X 链路资源带权二分图匹配框架如图 4 所示, 将 V2I 链路和 V2V 链路的接收用户分别列入二分图中两个互不相交的顶点集合 X 和 Y , 其中 V2I 链路用户为集合 X , V2V 链路用户为集合 Y 。顶点集合 X 和 Y 之间的边赋予权重 w_{ij} , 集合 X 的结点标杆值为 $L(x_i)$, 集合 Y 的结点标杆值为 $L(y_j)$ 。

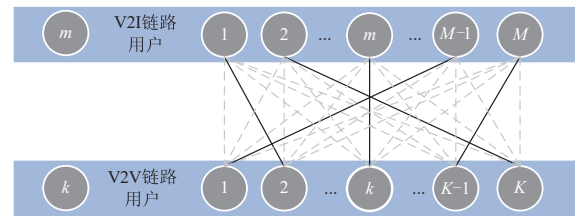


图 4 V2X 链路资源带权二分图匹配框架

KM 算法求的是完备匹配下的最大权匹配: 在一个二分图内, 对于集合 X 和集合 Y , 现对于每组集合连接 $x_i y_j$ 有权 w_{ij} , 求一种匹配使得所有 w_{ij} 的和最大。在 KM 算法执行过程中的任一时刻, 对于任一条边 $x_i y_j$, $L(x_i) + L(y_j) \geq w_{ij}$ 恒成立, 因此初始化时, 令集合 X 的结点标杆值 $L(x_i)$ 为 x_i 所有路径权值中的最大值, 集合 Y 的所有结点标杆值 $L(y_j)$ 均为 0。KM 算法成立基于定理: 若由二分图中所有满足 $L(x_i) + L(y_j) = w_{ij}$ 的边 $x_i y_j$ 构成的子图 (称做相等子图) 有完备匹配, 那么这个完备匹配就是二分图的最大权匹配。其中, 基于带权二分图 KM 算法的核心是匈牙利算法。

KM 算法步骤:

步骤 1: 初始化集合可行顶标的值;

步骤 2: 用匈牙利算法寻找完备匹配;

步骤 3: 若未找到完备匹配则修改可行顶标的值;

步骤 4: 重复步骤 2、步骤 3 直至找到相等子图的完备匹配为止。

匈牙利算法的思想是利用增广路径求最大匹配。对增广路径有定义: M 为无向图的一个匹配, 若路径 P 是无向图中一条连通两个未匹配顶点的路径, 并且属于 M 的边和不属于 M 的边 (即已匹配和待匹配的边) 在 P 上交替出现, 则称 P 为相对于 M 的一条增广路径。匈牙利算法的原理来源于由增广路径定义所推导的 3 个结论: 1) 增广路径 P 的第一条边和最后一条边都不属于匹配 M ; 2) 将匹配 M 和增广路径 P 进行取反操作可以得到一个更大的匹配 M' ; 3) 匹配 M 为二分图发

最大匹配当且仅当不存在匹配 M 的增广路径。

匈牙利算法步骤:

步骤 1: 初始化匹配 M 为空;

步骤 2: 找到一条增广路径 P , 通过异或操作获得更大的匹配 M' 替代匹配 M ;

步骤 3: 重复步骤 2 直到找不到增广路径, 即可得到二分图的最大匹配。

在链路信道资源的匹配过程中, 通过寻找二分图的增广路径得到二分图的最佳匹配, 即实现 5G 网络资源在不同 V2X 链路的最佳指派。在增广路径的搜索时, 利用匈牙利算法对二分图的指派路径进行优化求解, 从而快速找出 m 个 V2I 和 k 个 V2V 链路功率的指派生成路径, 即获得蜂窝车联网 V2X 链路的最佳资源分配策略。基于带权二分图匹配的资源分配搜索流程如图 5 所示。

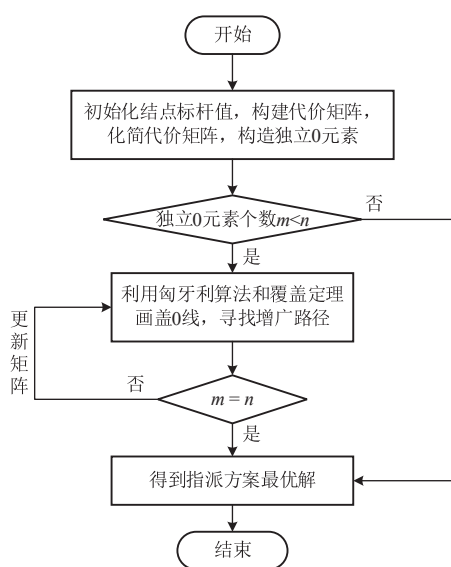


图 5 基于带权二分图匹配的资源分配搜索流程

带权二分图将 V2I 链路和 V2V 链路的接收信道功率划入 2 个互不相交的顶点集合, V2I 链路和 V2V 的信道容量为连接边权重, 求解出满足约束条件下的 V2V 和系统下行链路分配最优功率, 分别表示为 P_k 和 P_m 。

基于 KM 的资源分配算法为:

1) for $m = 1:M$ do

for $k = 1:M$ do

从 V2I 和 V2V 链路中获得需要优化的功率 (P_k, P_m) 将 (P_k, P_m) 代入公式 (15) 获得 C_m

If $C_m \leq C_0$ then

$C_m = -\infty$

end if

end for

end for

2) 初始化 V2I 链路集合和 V2V 链路集合的标杆值

3) 利用 C_m 构建二分图对应边的权重

4) 使用匈牙利算法寻找增广路径得到最佳路径

生成方案

5) 返回最优功率分配 (P_k, P_m) 和 V2I、V2V 链路匹配策略

3 仿真结果与分析

本节通过 Matlab 仿真平台对高速公路和城区交通场景下的基于 KM 的资源分配算法进行验证, 道路上的智能网联车辆遵循泊松分布原则, 从不同交通场景与不同链路数方面评估蜂窝车联网 V2X 系统的信道容量性能, 并与贪婪算法^[21]进行优化性能对比。蜂窝车联网 V2X 通信环境的仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真环境参数与设置

载波频率, f_c	2 GHz
带宽, W	10 MHz
基站的高度, h_{BS}	35 m
车辆的高度, h_{UT}	1.5 m
车辆天线增益, $G_{antenna}$	3 dB
噪声功率, σ^2	-114 dB
V2I 链路最小容量, C_0	0.5 bit/s
V2V 链路可容忍信干噪比, $SINR_0$	5 dB
V2I、V2V 最大传输功率, P_{max}	23 dB
V2I 链路总数, K	20
V2V 链路总数, M	20
V2V 链路可容忍的中断概率, p_0	0.001

图 6 评估了不同 V2V 链路中断概率下接收用户 SINR 的累计分布函数 (cumulative distribution function, CDF)。

由图 6 可知: 当 SINR 不断增大时, CDF 趋近于 1。其中, 当可容忍中断概率 $p_0 = 10^{-3}$ 时, V2V 链路满足最大容忍中断概率的约束条件, 即蜂窝车联网的 V2V 链路的连接性达到 99.9%。因此, 针对不同场景、不同车速等资源分配方案的性能对比时, 本文实验将可容忍中断概率配置为 10^{-3} 。

车辆速度作为影响蜂窝车联网 V2X 通信的关键因素之一^[22], 下面将评估不同车辆速度对 V2I 链路吞吐量性能的影响。图 7 和图 8 分别评估在高速公路和城区交通等不同交通道路场景下基于 KM 算法进行链路资源分配时的系统下行的吞吐量 ΣC_m 性能。由图 7 和图 8 可知, V2I 链路的信道容量随着信道反馈时延 T 的增大而减小; 当车辆速度 V 分别为 50、100 和 150 时, 随着信道反馈时延 T 的增加, 车辆速度为 50 时的 V2I 信道容量相对稳定, 车辆速度为 100 时的 V2I 信道容量出现较快速的下降, 当车辆速度为 150 时的 V2I 信道容量产生了急速的降低趋势, 主要原因在于多普勒频移与多径效应影响了 V2I 链路的稳定性, 在确保 V2V 链路的连接性条件时, 从而制约了 V2I 链路的整体容量性能。同时可以看出, 高速公路场景下的 V2I 链路的吞吐量性能优于城区场景, 主要原因在于高速公路场景中的遮挡物相对较少且车辆密度一般低于城区交通场景, 因此信道环境更优, 即通信损耗相较于城区交通场景会更小。

图 9 给出了蜂窝车联网中 V2V 链路数对 V2I 链路性能的影响。假设 V2I 链路数 M 设为 10 时, 随着 V2V 链路的增加, V2X 系统的 V2I 下行链路的信道容量呈现明显的下降趋势。同时, 蜂窝车联网 V2X 通信的发射功率也会影响到 V2I 链路的吞吐量性能, 从图中可看出, 发射功率设为 23 dB 时产生 V2I 链路的信道容量明显优于 18 dB 时, 这是因为随着系统 V2I 链路的增加, V2I 的下行链路通信需要与 V2V 链路共享带宽资源, 然而为了保证 V2V 链路的可靠性, 需要减少来自 V2I 链路的干扰, 即限制 V2I 链路的发射功率, 因此导致 V2I 链路的信道容量下降; 而且, V2I 链路受到更多干扰时, 会导致对应链路的接收 SINR 的降低。

为了评估蜂窝车联网 V2X 系统中 V2V 和 V2I 链路的发射功率和吞吐量之间的演变关系, 在满足约束条件的情况下, 基于 KM 算法对蜂窝车联网的功率进行动态分配, 产生的链路功率分配结果如图 10 所示。图 11 显示了 KM 算法与贪婪算法对频谱效率性能的影响。

由图 10 可知: 本文提出的 KM 算法可以较好地实现 V2X 通信系统的发射功率和吞吐量之间的平衡, 即所提算法可高效的管理网络资源, 在保证 V2V 可靠连接的同时, 可动态调节 V2I 链路的信道容量, 保障网络资源的充分利用。

由图 11 可知: 随着迭代次数的增加, 两种算法获得的 V2I 链路的频谱效率均呈现上升趋势。相比于

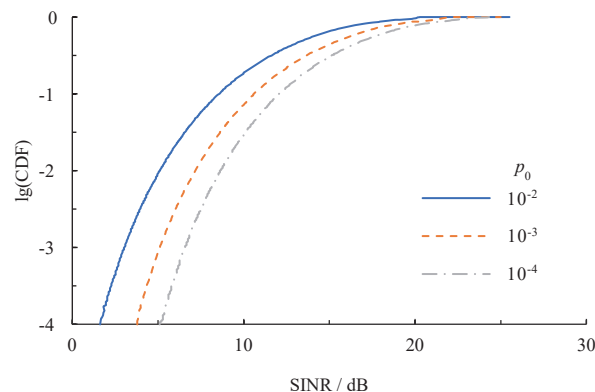


图 6 不同中断概率下的累计分布函数 (CDF)

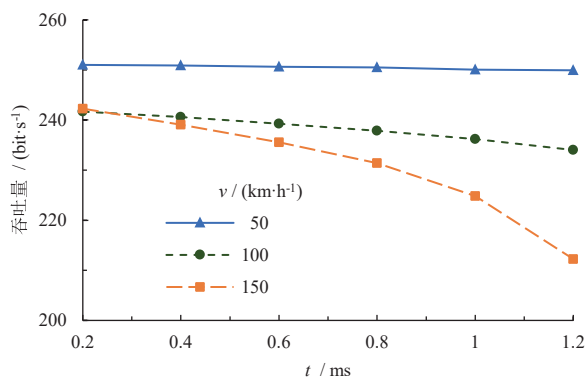


图 7 高速公路场景下的 V2I 吞吐量性能对比

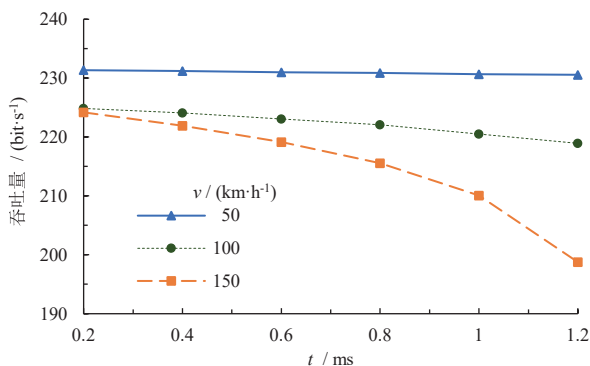


图 8 城区交通场景下的 V2I 吞吐量性能对比

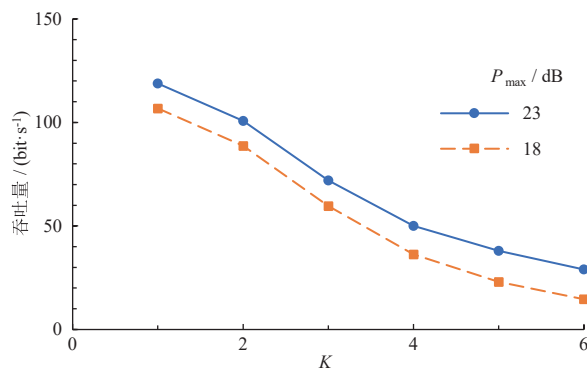


图 9 V2V 链路数目 K 和 V2I 链路吞吐量的关系

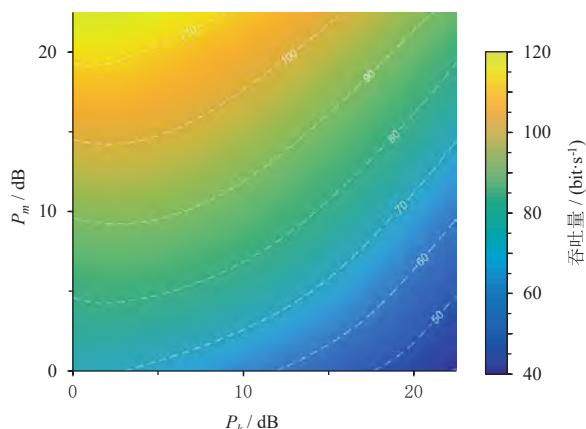


图 10 V2I 和 V2V 链路功率分配

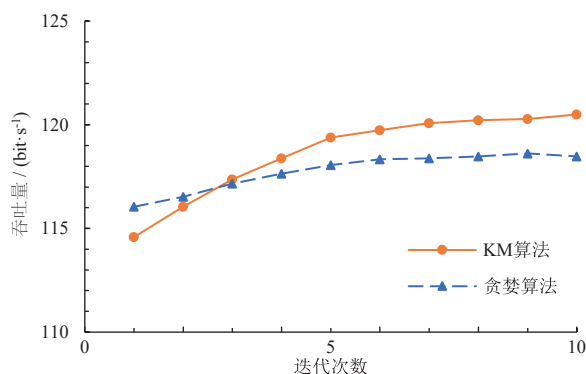


图 11 不同算法下的系统下行频谱效率性能对比

KM 算法, 贪婪算法可较快收敛到局部最优解。当迭代次数超过 3 次时, KM 算法获得 V2I 链路的吞吐性能优于贪婪算法; 随迭代次数的增加, KM 算法和贪婪算法在迭代次数为 7 及之后的 V2X 链路的频谱效率均基本保持为平缓趋势, 且 KM 算法获得的全局最优解性能明显优于贪婪算法。因此与贪婪算法相比, 迭代次数设为 7 次或之后的 KM 算法可以获得更优的吞吐性能。

4 结论

5G 蜂窝车联网实现信道资源的动态调度对优化 5G-V2X 通信具有非常重要意义, 本文提出了一种面向系统下行吞吐量最大化并保证 V2V 链路连接性的资源分配算法, 该算法采用实时感知信道状态信息, 利用 KM 算法将资源分配优化问题转化为二分图最大权值的匹配问题, 满足 V2I 下行吞吐量最大化并保证 V2V 链路的连接性要求。仿真验证结果表明: 所提出的 KM

算法在多次迭代后 (本文选为 7 次) 的下行吞吐量性能优于传统贪婪算法; 在中断概率、最大发射功率等约束条件下, 所提 KM 算法可适应城区和高速公路等不同蜂窝车联网环境以实现网络资源的优化分配, 为下一步部署基于 5G-V2X 网络的车路云协同系统提供理论基础与技术支持。

参考文献 (References)

- [1] 李克强. 我看智能网联汽车十年发展 [J]. 智能网联汽车, 2022(3): 6-9.
LI Keqiang. I see the ten-year development of intelligent connected vehicles [J]. *Intell Connec Vehi*, 2022(3): 6-9. (in Chinese)
- [2] Elfatih N M, Hasan M Kamrul, Kamal Z, et al. Internet of vehicle's resource management in 5G networks using AI technologies: Current status and trends [J]. *IET Commu*, 2021, 16(5): 400-420.
- [3] 郭静秋, 方守恩, 曲小波, 等. 基于强化协作博弈方法的双车道混合交通流特性 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2019, 47(7): 976-983.
GUO Jingqiu, FANG Shouen, QU Xiaobo, et al. Characteristics of two-lane mixed traffic flow based on enhanced cooperative game method [J]. *J Tongji Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 47(7): 976-983. (in Chinese)
- [4] 丁飞, 张楠, 李升波, 等. 智能网联车路云协同系统架构与关键技术研究综述 [J]. 自动化学报, 2022, 48(12): 2863-2885.
DING Fei, ZHANG Nan, LI Shengbo, et al. Overview of the research on the architecture and key technologies of the intelligent networked vehicle-road cloud collaboration system [J]. *J Automation*, 2022, 48(12): 2863-2885. (in Chinese)
- [5] 张海霞, 李腴腴, 李东阳, 等. 基于车辆行为分析的智能车联网关键技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 36-49.
ZHANG Haixia, LI Xianxian, LI Dongyang, et al. Research on key technologies of intelligent Internet of Vehicles based on vehicle behavior analysis [J]. *J Elec Info*, 2020, 42(1): 36-49. (in Chinese)
- [6] 唐群, 朱国强. 基于 MEC 的蜂窝网络联合计算与无线资源管理 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(14): 82-87.
TANG Qun, ZHU Guoqiang. MEC based cellular network joint computing and wireless resource management [J]. *Compu Engi Appl*, 2020, 56(14): 82-87. (in Chinese)
- [7] 吴杜成, 翟维维, 冯丛丛, 等. 5G 异构蜂窝网络资源管理研究 [J]. 移动通信, 2018, 42(3): 89-96.
WU Ducheng, ZHAI Weiwei, FENG Congcong, et al. Research on resource management of 5G heterogeneous cellular network [J]. *Mobi Commu*, 2018, 42(3): 89-96. (in Chinese)

- [8] 韩珍珍, 周末, 刘恩慧, 等. 基于用户个性化服务质量的蜂窝车联网与车载自组织网异构车联网资源分配方法[J]. 电子与信息学报, 2021, **43**(5): 1339-1348.
HAN Zhenzhen, ZHOU Mo, LIU Enhui, et al. Resource allocation method of cellular vehicle networking and vehicular Ad-Hoc network heterogeneous vehicle networking based on user personalized service quality [J]. *J Elec Info*, 2021, **43**(5): 1339-1348. (in Chinese)
- [9] WU Qiong, ZHAO Yu, FAN Qiang. Time-dependent performance modeling for platooning communications at intersection [J]. *IEEE Internet Things J*, 2022, **9**(19): 18500-18513.
- [10] LIANG Le, YE Hao, LI Geoffrey Ye. Spectrum sharing in vehicular networks based on multi-agent reinforcement learning [J]. *IEEE J Selc Areas Commu*, 2019, **37**(10): 2282-2292.
- [11] Brahmi I, Hamdi M, Zarai F. Chaotic Grey Wolf Optimization-based resource allocation for Vehicle-to-Everything communications [J]. *Int'l J CommuSyst*, 2021, **34**(13): 4908-4926.
- [12] Hussein H, Mohamed H R, Hussein A E, et al. Depth-first-search-tree based D2D power allocation algorithms for V2I/V2V shared 5G network resources [J]. *Wireless Networks*, 2021, **27**(5): 3179-3193.
- [13] 李方伟, 张海波, 王子心. 车联网中基于 MEC 的 V2X 协同缓存和资源分配 [J]. 通信学报, 2021, **42**(2): 26-36.
LI Fangwei, ZHANG Haibo, WANG Zixin. MEC based V2X collaborative caching and resource allocation in the Internet of Vehicles [J]. *J Communications*, 2021, **42**(2): 26-36. (in Chinese)
- [14] 王燕燕, 齐丽娜. 基于 D2D 的车联网中无线资源分配研究 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2018, **38**(4): 55-60.
WANG Yanyan, QI Lina. Radio resource allocation for D2D-based vehicle network [J]. *J Nanjing Univ Post Telecom (Nat Sci)*, 2018, **38**(4): 55-60. (in Chinese)
- [15] LIU Gang, WANG Zhiqing, HU Jiewen, et al. Cooperative NOMA broadcasting/multicasting for low-latency and high-reliability 5G cellular V2X communications [J]. *IEEE Internet Things J*, 2019, **6**(5): 7828-7838.
- [16] ZHU Hongbiao, WU Qiong, WU Xiaojun, et al. Decentralized power allocation for MIMO-NOMA vehicular edge computing based on deep reinforcement learning [J]. *IEEE Internet Things J*, 2022, **9**(4): 12770-12782.
- [17] 3GPP TSG SA1. 3GPP TS 22.186: Service requirements for enhanced V2X scenarios (V16.1.0) [S/OL]. (2017-03-09). https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.186.
- [18] 3GPP TSG SA 2. 3GPP TS 23.287: Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services (V16.5.0) [S/OL]. (2020-12-17). https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.287.
- [19] 3GPP TSG RAN 1. 3GPP TS 37.885: Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything V2X use cases for LTE and NR (V1.0.0) [S/OL]. (2018-05-11). https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.885.
- [20] 田兴鹏, 朱晓荣, 朱洪波. 基于 KM 算法的分布式无线节点任务分配方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2020, **43**(6): 96-102.
TIAN Xingpeng, ZHU Xiaorong, ZHU Hongbo. Distributed wireless node task allocation method based on KM algorithm [J]. *J Beijing Univ Posts and Telecom*, 2020, **43**(6): 96-102. (in Chinese)
- [21] Rajeev R, Navneet A, Sunil J. Interference mitigation and capacity enhancement of cognitive radio networks using modified greedy algorithm/channel assignment and power allocation techniques [J]. *IET Commu*, 2020, **14**(9): 1502-1509.
- [22] 郑银香, 侯帅, 沈旭, 等. 车联网典型应用场景业务建模及仿真方法 [J]. 移动通信, 2020, **489**(11): 80-85.
ZHENG Yinxiang, HOU Shuai, SHEN Xu, et al. Traffic modeling and simulation method for typical application scenarios of Internet of vehicles [J]. *Mobi Commu*, 2020, **489**(11): 80-85. (in Chinese)