

智能网联汽车多样化服务场景下功率与频谱联合优化算法

张海波¹, 胡雨婷¹, 胡艳丽², 徐勇军¹, 李永福³

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆市沙坪坝区歌乐山旅游景区事务中心, 重庆 400036;
3. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对智能网联汽车协同通信场景中日益增长的多样化服务需求, 提出了一种基于链路自适应的功率控制与频谱共享联合资源分配方案, 从而实现异构协同通信场景下的差异化资源分配。首先, 构建了一个包含车到基础设施 (V2I) 和车到车 (V2V) 链路的异构网络模型, 并提出了在发射功率和频谱资源受限的条件下, 最大化系统加权和速率的优化问题。在此基础上, 提出了一种基于几何规划理论的最优功率控制策略, 并推导出了在不同加权因子下的闭式功率分配解, 在有效降低计算复杂度的同时, 保证了车辆用户的服务质量。最后, 设计了功率控制与频谱共享的联合优化算法, 进一步提升了系统整体性能。仿真结果表明, 与基准算法相比, 所提算法在系统加权和速率方面提升了 33.7%。

关键词: 智能网联汽车; 功率控制; 频谱复用; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2026072

Joint power and spectrum optimization algorithm for ICV in diverse service scenarios

Zhang Haibo¹, Hu Yuting¹, Hu Yanli², Xu Yongjun¹, Li Yongfu³

1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Gele Mountain Tourism Scenic Area Affairs Center, Chongqing 400036, China
3. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: To address the problem of the increasingly diverse service demands in the cooperative communication scenarios of intelligent connected vehicles, a joint resource allocation scheme based on link adaptation was proposed for power control and spectrum sharing, thereby achieving differentiated resource allocation in heterogeneous cooperative communication scenarios. Firstly, a heterogeneous network model including vehicle to infrastructure (V2I) and vehicle to vehicle (V2V) links was constructed, and an optimization problem was proposed to maximize the system's weighted sum rate under the constraints of limited transmit power and spectrum resources. Secondly, an optimal power control strategy based on geometric programming theory was proposed, and a closed form power solution was derived under different weighting factors. While effectively reducing computational complexity, the service quality of vehicle users was ensured. Finally, a joint optimization algorithm for power control and spectrum sharing was proposed, further improving the overall system performance. Compared to the benchmark algorithm, the weighted sum rate is improved by approximately 33.7%.

Keywords: intelligent connected vehicles, power control, spectrum reuse, resource allocation

收稿日期: 2026-01-05; 修回日期: 2026-03-10

通信作者: 胡艳丽, h3217894389@163.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.SQ2023YFB250002402); 国家自然科学基金资助项目(No.62371082, No.U23A20279, No.62271094)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.SQ2023YFB250002402), The National Natural Science Foundation of China (No.62371082, No.U23A20279, No.62271094)

0 引言

近年来,以智能化和互联化为特征的全球新一轮科技和产业革命正在蓬勃兴起,作为此次变革的关键领域之一,智能网联汽车(intelligent connected vehicles, ICV)的快速发展引起了工业界与学术界的广泛关注^[1]。智能网联汽车通过车辆之间以及车辆和基础设施之间共享数据,突破了原有的单车局限,数据交互不再局限于单个车辆,而是扩大到整个智能交通系统,提升了系统交通效率和安全性。随着智能网联汽车的持续发展,车联网业务日益丰富,安全信息分发、车辆实时信息共享、车载信息娱乐服务,各类多样化的业务对车联网提出了越来越高的通信需求^[2]。然而,受限于有限的频谱资源,传统车联网已经难以满足各类新型业务对多样化、大容量数据交互的需求。

为应对上述挑战,蜂窝车联网(cellular-V2X, C-V2X)凭借其广域覆盖、高传输速率以及丰富的网络资源等特性,为智能交通提供一种新的通信解决方案^[3]。该技术不仅通过蜂窝网络增强驾驶安全与服务体验,其频谱复用机制更有效缓解了车联网频谱资源紧张问题。然而,随着网联车辆的规模不断扩大,频谱复用带来的干扰问题越来越严重。因此,必须采取有效的干扰管理措施以避免干扰^[4]。目前,车联网与蜂窝用户频谱共享主要有覆盖和底层两种模式。在覆盖模式下,蜂窝网络的部分频谱被分配给C-V2X通信使用,蜂窝用户与车载用户在独立的授权频段上传输,不存在干扰,频谱利用率低下。在底层模式下,蜂窝和车载用户同时使用共享相同蜂窝频段,虽然提高了频谱效率,但是由于同时接入,带来同频干扰问题^[5]。

1 相关工作

为了解决上述难题,研究者对频谱复用下的干扰管理及功率控制等关键技术进行了研究。文献[6]在C-V2X网络模式3场景下,考虑车载用户复用蜂窝用户频谱,联合功率分配和子载波分配,最小化不允许接入车辆链路数量,虽然提升了车辆接入率,但却牺牲了传输速率。文献[7]针对C-V2X系统中的上行链路复用问题,提出了一种链路自适应的资源分配方案,其中分配给每个用户的资源块数量是动态可变的,车到基础设施(vehicle to infrastructure, V2I)用户的总速率显著提升。但是该方

案仅关注V2I用户的总速率而忽略了系统整体性能优化。文献[8]通过联合优化可重构智能反射面反射系数矩阵、功率分配和频谱共享来最大化V2I用户的总容量,提出一种智能反射表面辅助的车联网资源分配算法。文献[9]考虑多个车辆用户可以和一个蜂窝用户使用同一个子载波,最大化所有车辆用户的数据速率总和,该方案虽然提升了车辆用户的性能,但是却以牺牲蜂窝用户的性能为代价。文献[10]提出了一种将图神经网络和深度强化学习相结合的方法,为车到车(vehicle to vehicle, V2V)和V2I通信提供了一种高效的资源分配策略,保证了V2I链路的高传输速率。文献[11]提出一种融合社会和物理属性的服务质量(quality of service, QoS)感知内容传播方案,最大化V2V用户的加权总速率,优化V2X网络中的内容共享效率,但是方案仅考虑V2V用户的发射功率优化,忽略了V2I用户的功率优化。文献[12]基于无线全双工技术,提出了一种双图着色的干扰管理方案来解决资源分配问题。上述资源分配方案主要考虑了一类用户的性能优化,但现实V2X场景中通常V2I用户和V2V用户并存。为了更好地提升车辆网络整体性能,文献[13]针对C-V2X的无线资源管理问题,提出了一种图匹配和深度确定性策略梯度联合算法,将问题解耦为集中式信道分配和分布式功率控制,提高了V2I和V2V链路的总容量。文献[14]针对目前资源分配算法复杂度高不适用于密集的C-V2X通信的问题,开发了一种低复杂性的资源分配方法,提高了系统整体和速率。文献[15]研究了一种基于路测单元辅助的车联网组播传输通信资源分配方案,在保证系统服务质量的前提下,有效提高了单位功率成本下系统的总速率。文献[16]研究了双时间尺度的车辆关联和资源管理方案,在降低信令开销的同时,最大化系统和速率。文献[17]综合考虑信任值和数据速率的优化,通过联合功率分配以及中继选择,最大化系统效用。

上述研究大多以最大化系统和速率或单一类型用户性能为目标,难以应对智能网联汽车中日益多样且差异化的用户需求。为了更清晰地体现不同业务类型的特性和网络需求,文献[18]将C-V2X系统中的6类典型业务进行了整理,如表1所示。这些服务在通信方式、数据速率要求和资源优先级上存在显著差异。现有大多数资源分配方案大多针对低

速场景或特定场景,难以满足车联网业务的多样化需求,因此有必要研究一种能够根据业务场景动态调整的资源分配方案。

表1 V2X通信服务类型

V2X服务类型	通信方式	数据速率/(Mbit·s ⁻¹)	资源分配优先级
协同感知	V2V	0.005~0.1	V2V>V2I
协同机动	V2V	2~5	V2V>V2I
协同传感	V2V	10~25	V2V>V2I
动态交通控制	V2I	0.5~2	V2V<V2I
非实时内容	V2I	1~5	V2V<V2I
实时内容	V2I	5~10	V2V<V2I

基于此,本文主要研究工作如下。

1) 基于智能网联汽车中的差异化链路速率需求,提出了一种动态资源分配方案。通过引入加权因子,实现了对V2I和V2V链路速率优先级的动态调整,构建了一个在链路的QoS约束和发射功率约束下的加权和速率最大化问题。

2) 提出了一种基于链路自适应的功率控制策略。在确保车辆链路QoS的同时,结合几何规划理论推导了不同加权因子下的最优功率集合。该策略能够根据链路的优先级快速进行功率分配,从而显著降低了计算复杂度,满足了实际网络中的实时性要求。

3) 基于上述最优功率控制策略,进一步提出了两种基于链路自适应的算法:最优资源分配算法(WF-ORA)和次优资源分配算法(WF-SRA)。两种算法能够高效地进行频谱分配和功率控制,且WF-SRA具有较低的计算复杂度。仿真结果表明,所提算法能够有效保障用户的QoS,同时在链路速率提升方面优于传统算法。

2 系统模型

2.1 底层模式下的C-V2X系统

系统模型如图1所示,考虑了底层模式下的C-V2X系统模型。其中,基站负责资源的分配和调度,每辆车配备一根天线,网络中包括 M 辆车与基站进行通信,通信链路表示为V2I链路; N 对车辆与车辆通信,通信链路表示为V2V链路。为了简单起见,将V2I链路和V2V链路集合定义为 $\mathcal{M}$ 和 $\mathcal{N}$, $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$, $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 。在这个

V2X场景中,整个系统的带宽均匀划分^[19],每个V2I链路被预先分配相互正交的子信道。由于相比于下行链路资源,上行资源利用较少,且基站具有更强的抗干扰性能,因此假设V2V链路复用V2I链路上行子信道的资源,且单个V2I链路最多被一个V2V链路复用,单个V2V链路仅能复用一个V2I链路。此外,假设V2I链路和V2V链路都有最低的QoS要求,并且基站具有所有链路的完美信道状态信息。除了文献[20]中使用的基于距离的路径损耗模型外,本文还考虑了多径传播引起的快衰落和阴影效应引起的慢衰落。表2为本文涉及的关键数学符号。

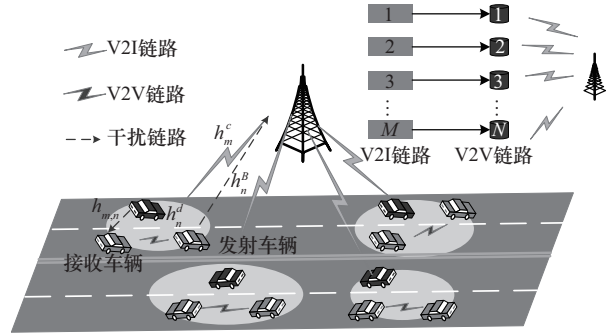


图1 系统模型

表2 关键数学符号

符号	定义
$\mathcal{M}$	V2I链路集合, $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$
$\mathcal{N}$	V2V链路集合, $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$
h_m^c	V2I用户 m 和基站之间的信道增益
h_n^b	V2V发射机 n 到基站的干扰链路信道增益
h_n^d	V2V链路 n 之间的信道增益
$h_{m,n}$	V2I发射机 m 到V2V接收机 n 的干扰链路信道增益
σ^2	高斯白噪声的方差
w	加权因子
$x_{n,m}$	频谱分配指标
p_m^c	V2I发射机 m 的发射功率
p_n^d	V2V发射机 n 的发射功率
$\gamma_{n,\min}^d, \gamma_{m,\min}^c$	V2V、V2I链路的最小信噪比
$P_{\max}^c, P_{\max}^d$	V2I、V2V用户的最大发射功率
R_m, R_n	V2I、V2V传输速率
R_{sum}	系统加权和速率

2.2 通信模型

基于上述信道模型, 得到第 m 个 V2I 用户和基站之间的信道增益, 即

$$h_m^c = \rho_m^c \kappa d_{m,c}^{-\varepsilon} g_m^c \quad (1)$$

其中, g_m^c 是服从指数分布的快衰落增益, ρ_m^c 表示服从对数正态阴影衰落的随机变量, κ 是路径损耗常数, $d_{m,c}$ 是第 m 个 V2I 用户到基站的距离, ε 表示信道衰落指数。

类似地, 可以定义第 n 个 V2V 链路之间的信道增益 h_n^d 和第 n 个 V2V 发射机到基站的干扰链路信道增益 h_n^B , 以及从第 m 个 V2I 发射机到第 n 个 V2V 接收机的干扰链路信道增益 $h_{m,n}$ 。基于以上讨论, 第 m 个 V2I 链路和第 n 个 V2V 链路的信干噪比分别表示为

$$\gamma_m^c = \frac{p_m^c h_m^c}{\sigma^2 + \sum_{n=1}^N x_{n,m} p_n^d h_n^B} \quad (2)$$

$$\gamma_n^d = \frac{p_n^d h_n^d}{\sigma^2 + \sum_{m=1}^M x_{n,m} p_m^c h_{m,n}} \quad (3)$$

其中, p_m^c 是第 m 个 V2I 发射机的发射功率, p_n^d 是第 n 个 V2V 发射机的发射功率, $x_{n,m}$ 是频谱分配指标, $x_{n,m} = 1$ 表示第 n 个 V2V 链路复用第 m 个 V2I 的上行子信道, 否则 $x_{n,m} = 0$ 。

第 m 个 V2I 链路和第 n 个 V2V 链路的数据速率为

$$R_m = \text{lb}(1 + \gamma_m^c) \quad (4)$$

$$R_n = \text{lb}(1 + \gamma_n^d) \quad (5)$$

2.3 优化目标

为协调多样且差异化的用户需求与有限频谱资源的矛盾, 本文定义了如下优化目标函数。

$$R_{\text{sum}} = w \sum_{m \in \mathcal{M}} R_m + (1 - w) \sum_{n \in \mathcal{N}} R_n \quad (6)$$

其中, $0 \leq w \leq 1$ 为加权因子, 用于调节 V2V 与 V2I 链路在资源分配中的相对优先级, 通过调整 w 的取值, 系统能够在不同公平性目标之间灵活权衡。本文通过引入动态权重因子, 构建了多样化服务场景, 此设计符合 3GPP TS 22.186^[21]中对各类车联网应用服务提出的差异化性能要求。

本文考虑在保证 V2I 和 V2V 链路服务质量的前提下, 通过联合优化传输功率控制和频谱复用选择, 来最大化系统总加权数据速率, 优化问题表述为

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\{x_{n,m}, p_n^d, p_m^c\}} R_{\text{sum}} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \gamma_n^d \geq \gamma_{n,\min}^d, \forall n \\ & \text{C2: } \gamma_m^c \geq \gamma_{m,\min}^c, \forall m \\ & \text{C3: } 0 \leq p_m^c \leq P_{\max}^c, \forall m \\ & \text{C4: } 0 \leq p_n^d \leq P_{\max}^d, \forall n \\ & \text{C5: } \sum_{n=1}^N x_{n,m} \leq 1, x_{n,m} \in \{0, 1\}, \forall m \\ & \text{C6: } \sum_{m=1}^M x_{n,m} \leq 1, x_{n,m} \in \{0, 1\}, \forall n \end{aligned} \quad (7)$$

其中, C1 为 V2V 链路的 QoS 约束; C2 为 V2I 链路的 QoS 约束, $\gamma_{n,\min}^d$ 和 $\gamma_{m,\min}^c$ 分别是 V2V 链路和 V2I 链路的最小信噪比要求; C3 和 C4 分别为 V2I 和 V2V 发射机的发射功率约束; C5 保证一个 V2V 链路最多只能复用一個 V2I 链路; C6 保证一个 V2I 链路最多被一个 V2V 链路复用。

式(7)为功率控制和频谱共享的联合优化问题。该问题同时涉及连续变量与离散变量, 属于混合整数非线性规划问题, 通常求解难度较大。为此, 在优化问题中引入 C5 和 C6 约束条件, 将系统干扰限制在各 V2I-V2V 配对内部, 从而将原始的混合整数非线性规划问题转化为可分离的优化问题。基于上述可分离结构, 将原问题转化为功率控制与频谱匹配两个子问题, 以显著降低计算复杂度。具体步骤如下: 针对每个 V2I-V2V 复用对, 在满足约束条件的前提下优化功率分配以最大化目标函数; 在得到最优功率分配后, 原问题转化为加权二分图上的最大匹配问题, 利用匈牙利算法与次优的双向稳定匹配算法实现最优频谱分配。

3 资源分配算法

3.1 功率控制

本节研究每一个 V2V 链路和 V2I 链路的最优功率分配, 给定第 n 个 V2V 链路复用第 m 个 V2I 链路的上行子信道, 原优化问题可以重写为

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \max_{\{p_n^d, p_m^c\}} w R_m + (1 - w) R_n \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \gamma_n^d \geq \gamma_{n,\min}^d, \forall n \\ & \text{C2: } \gamma_m^c \geq \gamma_{m,\min}^c, \forall m \\ & \text{C3: } 0 \leq p_m^c \leq P_{\max}^c, \forall m \\ & \text{C4: } 0 \leq p_n^d \leq P_{\max}^d, \forall n \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 目标函数为各 V2I-V2V 配对的加权和速率。问题 P2 仍属于非线性规划问题, 本文采用几何规划方法进行求解。首先, 明确由各项约束条件界定

的可行域范围。

为了确保约束C1成立,可以推得功率下限为

$$p_m^c \geq \frac{h_n^B \gamma_{m,\min}^c}{h_m^c} p_n^d + \frac{\gamma_{m,\min}^c \sigma^2}{h_m^c} \triangleq f_1(p_n^d) \quad (9)$$

同理,为了确保约束C1成立,可以推得功率上限为

$$p_m^c \leq \frac{h_n^d}{\gamma_{n,\min}^d h_{m,n}} p_n^d - \frac{\sigma^2}{h_{m,n}} \triangleq f_2(p_n^d) \quad (10)$$

基于此,上述优化问题的非空可行域可分为3种情形,其最优功率解必然位于该可行域内。

命题1 最优功率解中至少有一个功率变量将取功率峰值。

证明 设 $\alpha > 1$ 为辅助放大系数,用于对V2I与V2V链路的发射功率进行同比例放大,从而可以推导出不等式(11)和式(12)。

$$\begin{aligned} \text{lb} \left(1 + \frac{p_m^c h_m^c}{\sigma^2 + p_n^d h_n^B} \right) &\leq \text{lb} \left(1 + \frac{\alpha p_m^c h_m^c}{\sigma^2 + \alpha p_n^d h_n^B} \right) \\ &\triangleq R_m(\alpha p_n^d, \alpha p_m^c) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{lb} \left(1 + \frac{p_n^d h_n^d}{\sigma^2 + p_m^c h_{m,n}} \right) &\leq \text{lb} \left(1 + \frac{\alpha p_n^d h_n^d}{\sigma^2 + \alpha p_m^c h_{m,n}} \right) \\ &\triangleq R_n(\alpha p_n^d, \alpha p_m^c) \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可推得

$$\begin{aligned} w R_m(p_n^d, p_m^c) + (1-w) R_n(p_n^d, p_m^c) &\leq \\ w R_m(\alpha p_n^d, \alpha p_m^c) + (1-w) R_n(\alpha p_n^d, \alpha p_m^c) \end{aligned} \quad (13)$$

由命题1可知,最优功率解必然位于可行域的边界上。为进一步证明该最优解仅存在于可行域的顶点及边界上的特定点,需进一步引入命题2与命题3。

命题2 当 $w = 1 - w$ 时,最优功率解可以在满足约束的可行域角点集 Ω 中获得。

$$(p_n^{d*}, p_m^{c*}) = \arg \max_{(p_n^d, p_m^c) \in \Omega} \{w R_m + (1-w) R_n\} \quad (14)$$

其中,有

$$\Omega = \begin{cases} \{(P_1, P_{\max}^c), (P_2, P_{\max}^c)\}, \\ \gamma^c \leq \gamma_{m,\min}^c \text{ 且 } \gamma^d \geq \gamma_{n,\min}^d \\ \{(P_{\max}^d, P_3), (P_{\max}^d, P_4)\}, \\ \gamma^c > \gamma_{m,\min}^c \text{ 且 } \gamma^d < \gamma_{n,\min}^d \\ \{(P_1, P_{\max}^c), (P_{\max}^d, P_{\max}^c), (P_{\max}^d, P_4)\}, \\ \gamma^c > \gamma_{m,\min}^c \text{ 且 } \gamma^d \geq \gamma_{n,\min}^d \end{cases} \quad (15)$$

$$P_1 = \frac{(P_{\max}^c h_{m,n} + \sigma^2) \gamma_{n,\min}^d}{h_n^d} \quad (16)$$

$$P_2 = \frac{P_{\max}^c h_m^c - \gamma_{m,\min}^c \sigma^2}{\gamma_{m,\min}^c h_n^B} \quad (17)$$

$$P_3 = \frac{P_{\max}^d h_n^d - \gamma_{n,\min}^d \sigma^2}{\gamma_{n,\min}^d h_{m,n}} \quad (18)$$

$$P_4 = \frac{(P_{\max}^d h_m^c + \sigma^2) \gamma_{m,\min}^c}{h_n^B} \quad (19)$$

$$\gamma^c = \frac{P_{\max}^c h_m^c}{\sigma^2 + P_{\max}^d h_n^B} \quad (20)$$

$$\gamma^d = \frac{P_{\max}^d h_n^d}{\sigma^2 + P_{\max}^c h_{m,n}} \quad (21)$$

证明 具体证明参见文献[22]附录B部分。

命题3 问题式(8)的最优功率解为

$$(p_n^{d*}, p_m^{c*}) = \begin{cases} \arg \max_{(p_n^d, p_m^c) \in \Omega} f(p_n^d, p_m^c), w = 0.5 \\ \arg \max_{(p_n^d, p_m^c) \in \{\Omega \cup (p_n^d, p_{\max}^c)\}} f(p_n^d, p_m^c), w > 0.5 \\ \arg \max_{(p_n^d, p_m^c) \in \{\Omega \cup (p_{\max}^d, p_m^c)\}} f(p_n^d, p_m^c), w < 0.5 \end{cases} \quad (22)$$

证明 当 $w = 0.5$ 时,可以由命题2得到最优功率解,现针对 $w \neq 0.5$ 时的最优功率解进行推导。根据命题1,最优功率解中至少有一个功率变量将取功率峰值,不失一般性,将 p_n^d 设置为最大值,目标函数简化为

$$w \text{lb} \left(1 + \frac{p_m^c h_m^c}{\sigma^2 + p_{\max}^d h_n^B} \right) + (1-w) \text{lb} \left(1 + \frac{p_{\max}^d h_n^d}{\sigma^2 + p_m^c h_{m,n}} \right) \triangleq f(p_m^c) \quad (23)$$

对 $f(p_m^c)$ 求导并令

$$\frac{\partial f(p_m^c)}{p_m^c} = 0 \quad (24)$$

可得临界点方程 $a(p_m^c)^2 + bp_m^c + c = 0$ 。其中,系数满足

$$\begin{aligned} a &= wh_m^c (h_{m,n})^2 \\ b &= 2wh_m^c \sigma^2 h_{m,n} + h_m^c h_{m,n} h_n^d P_{\max}^d (2w-1) \\ c &= wh_m^c \sigma^4 + wh_m^c \sigma^2 P_{\max}^d h_n^d - (1-w) P_{\max}^d h_n^d h_{m,n} \sigma^2 - \\ &\quad (1-w) (P_{\max}^d)^2 h_n^d h_{m,n} h_n^B \end{aligned} \quad (25)$$

当 $w > 0.5$ 时, 有 $a, b > 0$, 此时最优解 p_m^{c*} 位于可行域边界, 即 $p_m^{c*} \in \Omega$; 当 $w < 0.5$ 时, b 可能为非正数, 出现非边界可行解, 其表达式为 $p_m^{c'} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$, 当且仅当 $p_m^{c'} > 0$ 时才为有效解。

由于变量存在对称性, 可以通过交换 a 、 b 、 c 索引, 求得 p_n^{d*} 。

当 $w = 0$ 时, 目标函数简化为

$$f(p_n^d p_m^c) = \text{lb} \left(1 + \frac{p_n^d h_n^d}{\sigma^2 + p_m^c h_{m,n}} \right) \quad (26)$$

其最优解可通过分析二阶导数予以证明, 具体证明如下。

关于 p_m^c 的二阶导数为

$$\frac{\partial^2 f}{\partial p_m^{c^2}} = \frac{2p_n^d h_n^d h_{m,n}^2}{(\sigma^2 + p_m^c h_{m,n})^3} > 0 \quad (27)$$

关于 p_n^d 的二阶导数为

$$\frac{\partial^2 f}{\partial p_n^{d^2}} = 0 \quad (28)$$

由于目标函数为凸函数且约束集 C1 ~ C4 构成凸集, 因此最优功率解必然位于可行域的边界上, 命题3得证。

3.2 资源分配

通过上述方法可以获得所有可能的频谱复用对的功率分配。当 $M > N$ 时, 会出现 $M - N$ 个 V2I 链路的频谱不能被 V2V 对复用的情况, 为此, 构造一组虚拟 V2V 对, 表示为 $\mathcal{N}' = \{N + 1, N + 2, \dots, M\}$ 。由于虚拟 V2V 对不能复用 V2I 链路的频谱, 因此虚拟 V2V 对的传输功率设置为零。此时设与虚拟 V2V 对配对的 V2I 链路的发射功率为 $P_{\max}^c$, 可以得到

$$R_{\text{sum}} = \text{wlb} \left(1 + \frac{p_m^c h_m^c}{\sigma^2} \right) \quad (29)$$

在完成所有可能的频谱对的功率分配问题后, 可根据获得的最优功率分配解来确定最优的频谱分配 $x_{n,m}^*$, 原优化问题可以重写为

$$\begin{aligned} \text{P3: } \max_{\{x_{n,m}\}} & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M x_{n,m} R_{\text{sum}} \\ \text{s.t. } & \text{C5: } \sum_{n=1}^N x_{n,m} \leq 1, x_{n,m} \in \{0, 1\}, \forall m \\ & \text{C6: } \sum_{m=1}^M x_{n,m} \leq 1, x_{n,m} \in \{0, 1\}, \forall n \end{aligned} \quad (30)$$

这是一个二分图最大匹配问题, 可以应用图匹配方法来解决, 建立二分图匹配模型, V2I 链路 $\mathcal{M}$ 和 V2V 链路 $\mathcal{N}$ 分别表示模型中顶点, $x_{n,m}$ 表示链路的匹配关系, R_{sum} 表示边的权重。建立二分图模型后, 信道分配问题可以等效于一个最大权重匹配问题, 可以通过匈牙利算法在多项式时间内有效求解^[23], 如算法1所示。

算法1 基于链路自适应的最优资源分配算法 (WF-ORA)

输入 M 个 V2I 和 N 个 V2V 的系统参数信息, 包括 h_m^c 、 h_n^B 、 h_n^d 、 $h_{m,n}$ 和系统资源约束 $\gamma_{m,\min}^c$ 、 $\gamma_{n,\min}^d$ 、 $P_{\max}^c$ 、 $P_{\max}^d$

输出 最优频谱复用矩阵 $\mathbf{X}$, 最优功率分配 p_m^{c*} 和 p_n^{d*}

- 1) 构建收益矩阵 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{M \times M}$, 用于存储所有 V2I-V2V 配对的加权和速率
- 2) 根据式(14)和式(22)获得每一个 V2I 和 V2V 链路的最优发射功率 p_m^{c*} 和 p_n^{d*}
- 3) 将最优发射功率代入式(8)得到每一个复用对的加权和速率 R_{sum}
- 4) 更新收益矩阵 $\mathbf{C}[m][n] \leftarrow R_{\text{sum}}$
- 5) 执行匈牙利算法: 在收益矩阵 $\mathbf{C}$ 上求解最优匹配
- 6) 返回最优频谱复用矩阵 $\mathbf{X}$, 最优功率分配 p_m^{c*} 和 p_n^{d*}

但在高密度车辆场景下, 匈牙利算法的时间复杂度呈指数级增长, 计算效率显著下降。为此, 本文进一步提出算法2, 通过双向偏好排序与局部优化策略, 在性能和复杂度之间达成平衡。下面是算法2的具体流程。

算法2 基于链路自适应的次优资源分配算法 (WF-SRA)

输入 M 个 V2I 和 N 个 V2V 的系统参数信息 h_m^c 、 h_n^B 、 h_n^d 、 $h_{m,n}$, 系统资源约束 $\gamma_{m,\min}^c$ 、 $\gamma_{n,\min}^d$ 、 $P_{\max}^c$ 、 $P_{\max}^d$

输出 最优频谱复用矩阵 $\mathbf{X}$, 最优功率分配 p_m^{c*} 和 p_n^{d*}

- 1) 遍历所有 V2I 链路 $m \in \mathcal{M}$ 和 V2V 链路 $n \in \mathcal{N}$
- 2) if V2I 链路允许复用 V2V 链路 then
- 3) 根据式(14)和式(22)计算最优发射功率 p_m^{c*} 和 p_n^{d*}
- 4) 根据式(8)计算加权和速率 R_{sum} , 根据式(4)

计算 V2I 链路速率 R_m

5) else

6) $R_{\text{sum}} = 0$

7) end if

8) 对于每个 V2I 链路 m , 按 R_m 降序生成 V2V 偏好列表 L_m

9) 对于每个 V2V 链路 n , 按 R_{sum} 降序生成 V2I 偏好列表 L_n

10) 定义 $\mathcal{M}_{um}$ 为未匹配的 V2I 链路集合, 定义 $\mathcal{N}_{um}$ 为未匹配的 V2V 链路集合

11) while $\mathcal{M}_{um} \neq \emptyset$ and $\mathcal{N}_{um} \neq \emptyset$

12) if $n \in \mathcal{N}_{um}$ then

13) 临时匹配 (m, n) , 从集合 $\mathcal{M}_{um}$ 和 $\mathcal{N}_{um}$ 中移除 m 和 n

14) else

15) 比较当前匹配的 $R_{\text{sum}}^*(m, n')$ 与新请求的 $R_{\text{sum}}^*(m, n)$

16) if $R_m^*(m, n) > R_m^*(m, n')$ then

17) 替换匹配为 (m, n) , 将 n' 重新加入 $\mathcal{N}_{um}$

18) else

19) 保留原有匹配 (m, n') , 拒绝 V2V 链路 n

20) end if

21) end if

22) end while

23) 获取频谱复用矩阵 $\mathbf{X}$, 并输出对应最优功率分配 p_m^* 和 p_n^*

4 复杂度分析

本节对 WF-ORA 和 WF-SRA 的计算复杂度进行理论分析。为便于表述, 定义 V2I 链路数量为 M , V2V 链路数量为 N 。对于任意给定的 V2I-V2V 配对, 其最优发射功率由命题 3 给出的闭式解确定, 由于该解只涉及基本的代数运算, 复杂度与 M 和 N 无关, 因此单次功率控制算法的复杂度是 $O(1)$, 考虑所有 V2I-V2V 对, 时间复杂度为 $O(MN)$ 。匈牙利算法的二分图顶点集由 M 个 V2I 顶点和 N 个 V2V 顶点构成, 其时间复杂度为 $O(M^3)^{[24]}$; 双向稳定匹配策略需要为每个 V2I 和 V2V 构建偏好列表, 这一步骤需要遍历所有配对进行排序, 复杂度为 $O(M^2)$, 综合考虑, WF-ORA 和 WF-SRA 的时间复杂度分别为 $O(MN + M^3)$ 和

$O(MN + M^2)$ 。

5 仿真分析

本文通过使用 MATLAB 仿真对所提算法的性能进行了验证, 首先对仿真设置进行介绍, 然后给出数值结果和分析, 并将本文算法与现有算法进行对比, 证明了本文算法的优越性。根据 3GPP TR 36.885^[25]中描述的案例进行仿真设置, 如图 1 所示。基站位于道路中心, 距离道路 35 m, 车道宽度为 4 m, 所有车辆位置生成服从空间泊松分布, 相邻车辆的平均距离取决于车辆的速度。在生成的车辆中, 随机选择 M 个车辆进行 V2I 通信, N 个车辆进行 V2V 通信, 其中 V2V 通信车辆对总是在相邻车辆之间形成, 本文假设每条 V2I 链路占有相同带宽, 具体仿真参数如表 3 所示。每个仿真结果均是通过平均至少 1 000 次信道实验得到的。

表3 仿真参数

参数	值
载波频率/GHz	2
带宽/MHz	10
基站覆盖半径/m	500
基站天线高度/m	25
基站天线增益/dBi	8
基站接收机噪声/dB	5
车辆天线高度/m	1.5
车辆天线增益/dBi	3
车辆接收机噪声/dB	9
车辆位置生成模型	空间泊松分布
车道数	双向 6 车道
车道宽度/m	4
车道密度	平均车距=2.5×车速
车速/(km·h ⁻¹)	60~120
V2I、V2V 链路最小信噪比阈值/dB	3、5
V2I 链路数量	20
V2V 链路数量	12~20
V2I、V2V 链路最大发射功率/dBm	23
噪声功率/dBm	-114

为全面验证所提算法的性能, 选取以下 3 个对比算法。

1) 随机算法: 发射功率固定为最大值, 频谱分配采用随机匹配策略。

2) 基于伯恩斯坦逼近的鲁棒资源分配算法 (简称 BRRA 算法): 该算法由文献[26]提出, 仅考虑 V2I 链路传输速率。

3) 基于 NOMA 的联合车辆配对、频谱分配和功率控制算法 (简称 NOMA-JVP-SA-PCA 算法): 该算法由文献[27]提出, 采用非正交多址技术实现车辆配对、频谱分配与功率控制的联合优化。

图 2 为不同算法的对比结果。结果表明, 随着车速的增加, 每种算法的加权和速率均呈下降趋势。这一现象的原因在于车速的增加会导致车辆链路的信道增益下降, 从而使用户接收功率降低。在相同车速下, 以 80 km/h 为例, WF-ORA 在加权和速率上达到 216.7 bit/(s·Hz), 相比随机算法约提升 33.7%, 对比 BRRA 和 NOMA-JVP-SA-PCA 也有一定程度的提升。BRRA 在进行资源分配时优先考虑 V2I 链路的总速率, 忽略了 V2V 和速率的提升; 随机算法采取随机分配, 性能最差; NOMA-JVP-SA-PCA 在高速场景下性能不如本文算法。

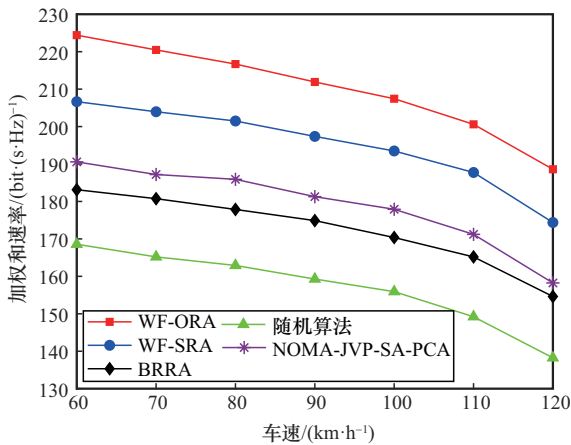


图2 不同算法的对比结果

图 3 为 WF-ORA 和 WF-SRA 的加权和速率与加权因子之间的关系。由图 3 可知, 当 $w \in [0, 0.7]$ 时, 加权和速率随着加权因子的增加而逐渐下降; 当 $w \in [0.7, 1.0]$ 时, 加权和速率随着加权因子的增加而逐渐上升。这一现象表明, 加权因子的引入增强了目标函数的非线性特征。呈现这种变化的主要原因是当 $w < 0.7$ 时, V2V 链路在目标函数中占有更大比重, 此时 V2I 链路速率的提升不足以弥补 V2V 链路速率的下降, 所以曲线呈下降趋势;

当 $w \geq 0.7$ 时, V2I 链路在目标函数中占更大比重, 此时, V2I 链路速率的提升速度超过了 V2V 链路速率的下降速度, 因此曲线呈上升趋势。

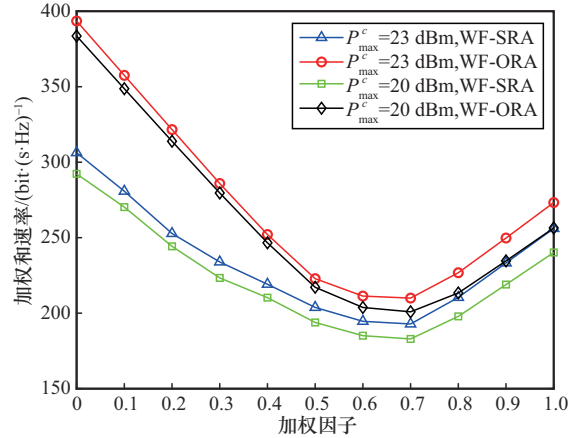


图3 WF-ORA 和 WF-SRA 的加权和速率与加权因子之间的关系

图 4 为不同算法下加权和速率与不同数量的 V2V 对数量的关系。结果表明, 随着 V2V 对数量的增加, 每种算法的加权和速率均呈增长趋势。这是因为随着 V2V 对数量的增加, 可接受的 V2V 对数量也增加, 从而提升了系统的整体性能。然而, 当 V2V 对数量达到一定规模时, 网络逐渐趋于饱和, 此时再增加 V2V 对数量对系统加权和速率的提升作用逐渐减小。当 V2V 对数量为 16 时, WF-ORA 的加权和速率为 192.5 bit/(s·Hz), 相比随机算法提升 38.1%, 相比 BRRA 提升 26.8%, 相比 NOMA-JVP-SA-PCA 提升 21.8%。这一结果表明, 本文算法能够更有效地利用 V2V 链路资源, 从而在较高的 V2V 对数量下保持较好的性能。

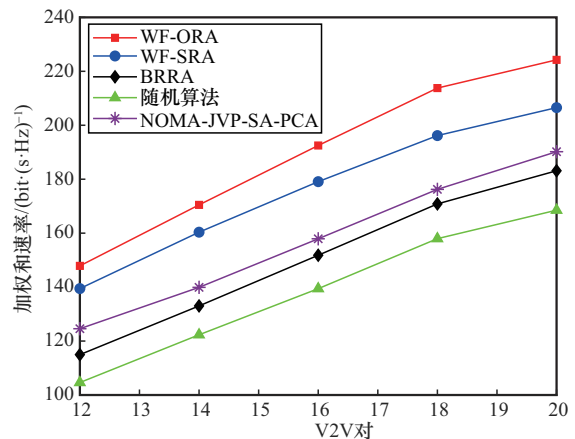


图4 不同算法下加权和速率与不同数量的 V2V 对数量的关系

图5为不同V2I链路的最小信噪比阈值对加权和速率的影响。从图5可以看到,在相同V2I链路最大发射功率条件下,WF-ORA和WF-SRA的加权和速率都随着V2I链路的最小信噪比阈值的增加而逐渐减小。当 $\gamma_{m,\min}^c$ 从3 dBm增加到8 dBm,WF-ORA加权和速率降低了约4.8%,WF-SRA加权和速率降低了约4.2%。这一变化趋势的主要原因是,当V2I链路的最小信噪比阈值增加时,V2I链路对干扰的容忍度降低,从而对配对的V2V链路的发射功率施加了更加严格的限制。随着这些限制的增加,原本能够复用的V2V链路可能不再满足复用要求,导致加权和速率出现下降趋势。

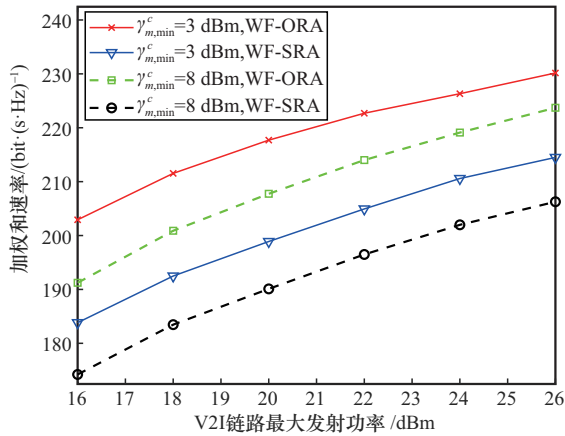


图5 不同V2I链路的最小信噪比阈值对加权和速率的影响

图6为V2I链路的最大发射功率对系统加权和速率的影响。随着V2I链路最大发射功率的增加,系统加权和速率不断增加。这是因为更高的V2I发射功率扩展了功率分配的可行域,从而提高了系统的加权和速率。然而,随着V2I发射功率的进一步增大,V2I链路对V2V链路的干扰也逐渐增强。为减少这种干扰,V2V链路的发射功率需要相应增加。然而,由于系统存在最大发射功率的限制,V2V发射功率的提升受到制约,因此系统加权和速率的增长速度逐渐放缓。这一现象表明,尽管增加V2I发射功率有助于提升系统性能,但过高的发射功率会引入更多的干扰,进而限制了性能的进一步提升。

图7为WF-ORA和WF-SRA在有无功率分配下的加权和速率与车辆速度的关系。从图7可以看出,随着车辆速度的增加,无论是否采用功率分配,系统的加权和速率均呈下降趋势。此外,

为了评估所提算法的性能,当未采用功率分配时,V2I和V2V发射功率均设为最大值。当车速为80 km/h时,采用功率分配的WF-ORA加权和速率为217.1 bit/(s·Hz),未采用功率分配时仅为184.5 bit/(s·Hz),功率分配带来了17.7%的性能增益。这表明优化的功率分配能够有效平衡V2I与V2V链路间的干扰,适应不同车速下的网络需求,显著提升系统性能。

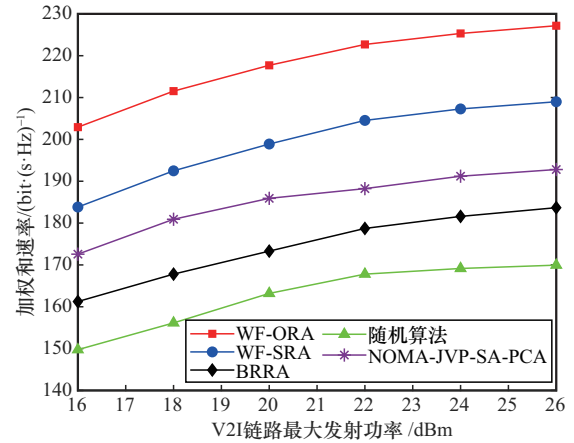


图6 V2I链路的最大发射功率对系统加权和速率的影响

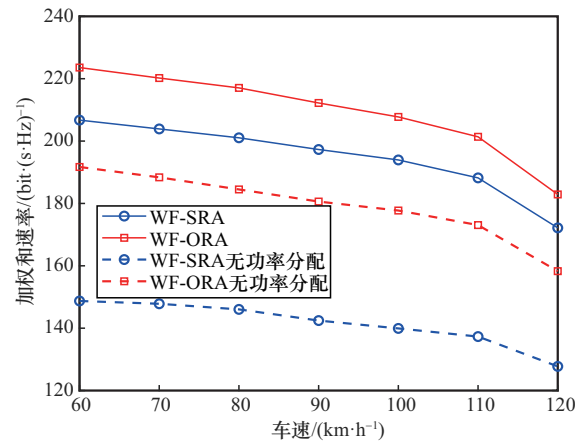


图7 WF-ORA和WF-SRA在有无功率分配下的加权和速率与车辆速度的关系

6 结束语

针对智能网联汽车协同通信场景中日益增长的多样化服务需求,本文提出了一种基于链路自适应的功率控制与频谱共享联合资源分配方案,以实现异构场景下的差异化资源分配。通过考虑V2I链路和V2V链路在不同业务场景下的传输速率需求差异,引入动态权重因子,构建加权和速率优化目标函数,以实现频谱效率与业务公平性

的动态平衡。在保证 QoS 要求和最大发射功率约束的前提下,对功率分配和频谱复用进行联合优化。首先,推导了不同加权因子下的最优功率分配集合。然后,针对频谱复用问题,设计了两种不同的频谱分配方法来解决,包括匈牙利方法和双向稳定匹配方法。最后,设计了两种资源分配算法,通过仿真验证,本文算法在优化频谱复用决策和功率控制,以及提升系统加权和速率方面,表现均优于其他基准算法。未来研究将聚焦于在中继辅助场景下的资源分配问题,以应对远距离或遮挡环境下的 V2V 通信挑战。

参考文献:

- [1] Siegel J E, Erb D C, Sarma S E. A survey of the connected vehicle landscape: architectures, enabling technologies, applications, and development areas[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(8): 2391-2406.
- [2] Alharthi A, Ni Q, Jiang R. *Internet of vehicles*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [3] Zhou H B, Xu W C, Chen J C, et al. Evolutionary V2X technologies toward the Internet of vehicles: challenges and opportunities[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2020, 108(2): 308-323.
- [4] Sehla K, Nguyen T M T, Pujolle G, et al. Resource allocation modes in C-V2X: from LTE-V2X to 5G-V2X[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(11): 8291-8314.
- [5] Abbas F, Fan P Z, Khan Z. A novel low-latency V2V resource allocation scheme based on cellular V2X communications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(6): 2185-2197.
- [6] Aslani R, Saberinia E, Rasti M. Resource allocation for cellular V2X networks mode-3 with underlay approach in LTE-V standard[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(8): 8601-8612.
- [7] Thakur K P, Palit B. A QoS-aware uplink spectrum and power allocation with link adaptation for vehicular communications in 5G networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2025, 22(1): 592-604.
- [8] 陈发堂, 张若凡. 可重构智能反射面辅助的车联网资源分配算法研究[J]. *通信学报*, 2023, 44(9): 70-78.
Chen F T, Zhang R F. Research on IoV resource allocation algorithm assisted by reconfigurable intelligent surface[J]. *Journal on Communications*, 2023, 44(9): 70-78.
- [9] Ibrahim A M A, Chen Z G, Wang Y J, et al. Optimizing V2X communication: spectrum resource allocation and power control strategies for next-generation wireless technologies[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(2): 531.
- [10] Ji M X, Wu Q, Fan P Y, et al. Graph neural networks and deep reinforcement learning-based resource allocation for V2X communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(4): 3613-3628.
- [11] Bute M S, Fan P Z, Luo Q Y, et al. QoS-aware content dissemination based on integrated social and physical attributes among cellular and V2V users[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(9): 12181-12194.
- [12] Guo S Q, Hu B J, Wen Q J. Joint resource allocation and power control for full-duplex V2I communication in high-density vehicular network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(11): 9497-9508.
- [13] Zhou Q Z, Guo C, Wang C, et al. Radio resource management for C-V2X using graph matching and actor-critic learning[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(12): 2645-2649.
- [14] Bahonar M H, Omid M J, Yanikomeroğlu H. Low-complexity resource allocation for dense cellular vehicle-to-everything (C-V2X) communications[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 2695-2713.
- [15] Ihsan A, Chen W, Zhang S Q, et al. Energy-efficient NOMA multicast system for beyond 5G cellular V2X communications with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 10721-10735.
- [16] Xue T, Ding H, Zhang H X, et al. Two-timescale vehicle association and resource management for C-V2X networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(7): 1259-1263.
- [17] Saleh Bute M, Fan P Z, Liu G, et al. Trust-aware V2V relay-assisted content distribution in cellular V2X networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(8): 13452-13466.
- [18] Zhang M L, Dou Y, Chong P H J, et al. Fuzzy logic-based resource allocation algorithm for V2X communications in 5G cellular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(8): 2501-2513.
- [19] Shan L Q, Wang M M, Zhang F H, et al. Resource allocation for cellular device-to-device-aided vehicle-to-everything networks with partial channel state information[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2022, 33(7): e4501.
- [20] Yu C H, Doppler K, Ribeiro C B, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2752-2763.
- [21] 3GPP. 6 Service requirements for enhanced V2X scenarios: 3GPP TS 22.18[S]. 2019.
- [22] Feng D Q, Lu L, Yi Y W, et al. Device-to-device communications underlaying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [23] West D B. *Introduction to graph theory*[M]. Bengaluru: India Pearson Education, 2002.
- [24] Li X S, Ma L, Shankaran R, et al. Joint power control and resource allocation mode selection for safety-related V2X communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7970-7986.
- [25] 3GPP. 3GPP release 14 technical specification group radio access network[R]. 2016.
- [26] Wang P, Wu W H, Liu J Y, et al. Joint spectrum and power allocation for V2X communications with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on*

Vehicular Technology, 2023, 72(12): 16338-16353.

- [27] Xue T, Zhang H X, Ding H, et al. Joint vehicle pairing, spectrum assignment, and power control for sum-rate maximization in NOMA-based V2X underlaid cellular networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(12): 22337-22349.

[作者简介]



张海波 (1979-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为车联网、区块链、资源分配等。



胡雨婷 (2000-), 女, 安徽淮南人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为车联网、资源分配等。



胡艳丽 (1983-), 女, 山西朔州人, 重庆市沙坪坝区歌乐山旅游景区事务中心中级工程师, 主要研究方向为无线通信等。



徐勇军 (1986-), 男, 湖北赤壁人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为反向散射通信、智能反射表面、通感一体化等。



李永福 (1983-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为智能网联汽车、智能交通系统和无人机集群控制等。