

# 可重构智能反射面辅助的车联网资源分配算法研究

陈发堂, 张若凡

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘要:** 面对车辆通信对通信质量和频谱效率的更高要求, 提出了一种可重构智能反射面 (RIS) 辅助的车联网资源分配算法。联合考虑 RIS 反射系数矩阵、功率分配和频谱共享方案, 在确保 V2V 链路的可靠性条件下, 建立一个 V2I 链路总容量最大化问题。由于该问题是一个变量之间高度耦合的非凸优化问题, 难以直接求解。因此, 在引入解析表达式近似 V2V 链路的的中断概率后, 利用块坐标下降 (BCD) 法将此问题分解为 3 个子问题, 并通过引入辅助变量、逐次凸逼近 (SCA)、匈牙利算法等对子问题进行求解, 进而得到问题的近似次优解。仿真结果表明, 所提算法具有良好的收敛性能, 并能够有效地提高 V2I 链路总容量。

**关键词:** 车联网通信; 可重构智能反射面; 资源分配; 块坐标下降

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023145

## Research on IoV resource allocation algorithm assisted by reconfigurable intelligent surface

CHEN Fatang, ZHANG Ruofan

School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

**Abstract:** In order to meet the higher requirements of vehicle communication quality and spectral efficiency, a IoV resource allocation algorithm assisted by reconfigurable intelligent surface (RIS) was proposed. The RIS reflection coefficient matrix, power allocation, and spectrum sharing schemes were combined to solve the problem of maximizing the total capacity of V2I link under the condition of ensuring the reliability of V2V link. As this problem was a non-convex optimization problem with highly coupled variables, it was difficult to solve it directly. Therefore, after introducing an analytic expression to approximate the interrupt probability of V2V link, the problem was decomposed into three sub-problems by using the block coordinate descent (BCD) method, and the sub-problems were solved by introducing auxiliary variables, successive convex approximation (SCA), Hungarian algorithm, etc., and then the approximate suboptimal solution of the problem was obtained. Simulation results show that the proposed algorithm has good convergence performance and can effectively improve the total capacity of V2I link.

**Keywords:** IoV communication, reconfigurable intelligent surface, resource allocation, block coordinate descent

### 0 引言

随着智能交通系统 (ITS, intelligent transportation system) 的快速普及, 人们对超可靠低时延通信 (URLLC, ultra-reliable and low-latency

communication) 越来越重视, 车联网 (IoV, Internet of vehicles) 作为自动驾驶和智能交通系统的重要技术, 能够在保证车辆行驶安全和高效的同时使人们的日常旅行更加方便和舒适<sup>[1]</sup>。然而在实际 IoV 通信中, 建筑物、丘陵和植物可能会产生强

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-04-04

通信作者: 张若凡, 18554006842@163.com

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (No.cstc2021jcyj-msxmX0454)

**Foundation Item:** The Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2021jcyj-msxmX0454)

烈的遮蔽效应，从而降低能效和频谱效率，并且地面车辆的高机动性也会降低信道稳定性，导致传输速率变低<sup>[2]</sup>。IoV 通信不稳定会给驾驶安全和通信带来风险，所以当前研究最重要的是在满足通信可靠性的前提下扩大通信范围，提高通信稳定性。为了提高车载通信的质量，可重构智能反射面（RIS, reconfigurable intelligent surface）在增强无线传输方面引起了广泛关注。

RIS 是一种可以通过编程控制电磁波相位，使用反射重新设计信道的无源反射元件<sup>[3]</sup>。当发射方和接收方之间的 LOS (line-of-sight) 被障碍物遮挡时，可以通过 RIS 反射建立绕过障碍物的新传播路径，并且该反射路径可以提高信噪比，通过控制反射电磁波的传播，RIS 能够克服由多径效应和阴影衰落带来的影响<sup>[4]</sup>。

目前，关于 RIS 辅助无线通信的研究已经有了许多有价值的成果。文献[5]集成 RIS 到基于正交频分多址的多用户下行链路通信系统中，通过对 RIS 反射系数、时频资源块和功率分配的联合优化以最大化多用户的公共速率。文献[6]研究了 RIS-UAV (unmanned aerial vehicle) 辅助上行链路无线通信系统的安全能效最大化问题，通过联合优化 UAV 的轨迹、RIS 的相移、用户关联系数和基站 (BS, base station) 发射功率来最大化系统的安全速率。文献[7]研究了在多 V2I (vehicle to infrastructure) 和 V2V (vehicle to vehicle) 情况下，通过对 RIS 相移矩阵和功率分配联合优化来增加 V2I 链路的容量。文献[8]提出的三阶段启发式算法能够在满足车辆社会信任的前提下显著提高上行 V2I 链路的容量。但文献[7]在对 RIS 反射系数矩阵和功率分配联合优化时忽略了蜂窝车辆用户设备 (C-VUE, cellular vehicle user equipment) 和 D-VUE (device to device vehicle user equipment) 的配对优化，文献[7-8]对 V2V 的可靠性均简单考虑了 V2V 链路需要满足的最低信噪比要求，并未从中断概率的角度研究，无法全面准确地评估通信质量。

为了更好地表示链路的可靠性，文献[9-10]分别将发射方和 RIS、RIS 和接收方建模为瑞利分布和莱斯分布，推导了系统的中断概率表达式。文献[11]研究了 RIS 辅助 V2I 通信的中断概率，利用级数展开和中心极限定理推导了中断概率的近似表达式。然而上述表达式均是基于特定信道模型和衰落条

件下的近似，并不能作为一个约束条件应用到实际问题中进行优化求解。

综上所述，受 RIS 可以极大提高无线环境下通信质量的启发，本文提出了一种 RIS 辅助的车联网资源分配算法。由于车辆的高机动性，在实际应用中很难追踪到瞬时信道状态信息 (CSI, channel state information) 并获得准确的估计值，故本文利用缓慢变化的大尺度 CSI 来代替瞬时 CSI。在考虑 V2V 通信的可靠性要求时，使用中断概率作为性能指标，由于其概率约束的分析公式不适于优化和资源分配，需要引入解析表达式来对其近似。基于以上条件，本文对 RIS 反射系数优化、功率分配和频谱共享问题提出了一种有效的优化算法。

本文主要研究工作如下。

1) 基于不同车辆、RIS 和基站位置构建系统模型，使用缓慢变化的大尺度 CSI 来代替瞬时 CSI。在使用阶跃函数近似表示 V2V 链路可靠性的前提下，研究了 RIS 辅助 IoV 的联合资源优化问题，旨在满足各种 IoV 通信需求的前提下使 V2I 链路容量最大化。

2) 提出一种利用块坐标下降 (BCD, block coordinate descent) 法的资源分配算法来求解以上多变量混合整数非凸问题，并利用引入辅助变量、逐次凸逼近 (SCA, successive convex approximation)、匈牙利算法等进行求解，同时给出了本文的算法步骤、计算复杂度和收敛性分析。

3) 仿真结果表明，RIS 可以在很大程度上补偿由车辆高机动性带来的信道增益损失，并且本文所提算法能够有效提高 V2I 的链路容量。

## 1 系统模型及问题描述

考虑一个由 BS、RIS 和地面车辆 (VUE) 组成的 RIS 辅助车辆网络模型，如图 1 所示。车辆通信网络由 V2I 和 V2V 链路构成，定义  $m \in \mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$  表示第  $m$  个 C-VUE 通过 V2I 链路与基站通信， $l \in \mathcal{L} = \{1, 2, \dots, L\}$  表示第  $l$  对 D-VUE，在不失一般性的前提下，V2V 链路的数量往往不少于 V2I 链路的数量，即  $L \geq M$ 。为了充分利用信道资源，提高频谱效率，C-VUE 的频带会被 D-VUE 重用，所以 V2V 链路会给 V2I 链路带来干扰。本文重点关注 RIS 辅助的车辆网络资源分配来提高系统容量，因此假设所有车辆及基站均配备单天线<sup>[12]</sup>。

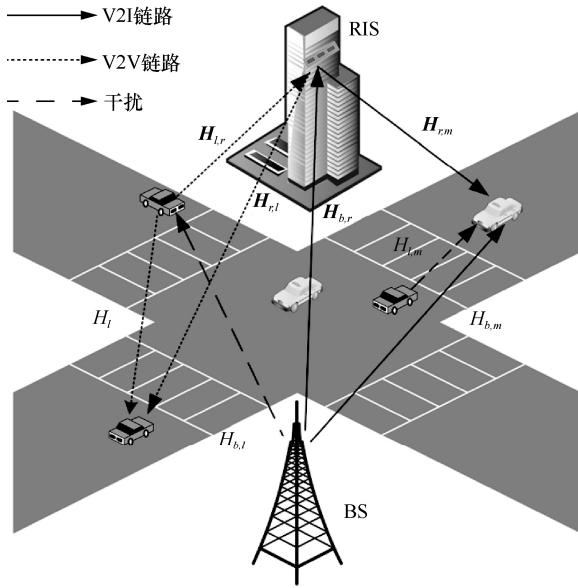


图 1 RIS 辅助车辆通信网络

BS 到第  $m$  个 C-VUE 的信道增益可以表示为  $H_{b,m} = \sqrt{\rho d_{b,m}^{-\alpha_{b,m}}} \tilde{H}_{b,m}$ , 其中,  $\rho$  是参考距离为 1 m 时的路径损耗,  $\alpha_{b,m}$  是基站到第  $m$  个 C-VUE 的路径损耗指数,  $d_{b,m}$  是基站与第  $m$  个 C-VUE 之间的距离,  $\tilde{H}_{b,m}$  是具有零均值和单位方差的复高斯分布随机散射分量。

RIS 由一个带有  $N$  个反射元件的均匀线性阵列 (ULA, uniform linear array) 和一个控制器组成, 从 RIS 到 BS 的信道增益  $\mathbf{H}_{b,r} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  符合莱斯分布, 可以表示为

$$\mathbf{H}_{b,r} = \sqrt{\rho d_{b,r}^{-\alpha_{b,r}}} \left( \sqrt{\frac{K_{b,r}}{1+K_{b,r}}} \mathbf{H}_{b,r}^{\text{LOS}} + \sqrt{\frac{1}{1+K_{b,r}}} \mathbf{H}_{b,r}^{\text{NLOS}} \right) \quad (1)$$

其中,  $\alpha_{b,r}$  是 BS 到 RIS 的路径损耗指数;  $d_{b,r}$  是 BS 与 RIS 之间的距离, 本文将 RIS 的第一个元素视为参考点, BS 与 RIS 之间的距离可以通过 BS 与 RIS 第一个元素之间的距离来近似计算;  $K_{b,r}$  是莱斯因子; NLOS (non-line-of-sight) 分量  $\mathbf{H}_{b,r}^{\text{NLOS}}$  的每个元素都是具有零均值和单位方差的复高斯分布; LOS 分量  $\mathbf{H}_{b,r}^{\text{LOS}}$  由 ULA 天线阵列响应组成<sup>[13]</sup>。

从 RIS 到第  $m$  个 C-VUE 的信道增益同样满足莱斯分布,  $\mathbf{H}_{r,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  的具体表达式与  $\mathbf{H}_{b,r}$  类似, 就 C-VUE 到 RIS 链路的 LOS 分量  $\mathbf{H}_{r,m}^{\text{LOS}}$  而言, RIS 处的到达角 (AOA, angle of arrival) 主要取决于车辆位置, 即  $\vartheta_{\text{AOA}} = \arccos\left(\frac{|\chi_r - \chi_m|}{d_{r,m}}\right)$ , 其中,

$\chi_r$ 、 $\chi_m$ 、 $d_{r,m}$  分别是 RIS 的位置、第  $m$  个 C-VUE 的位置、RIS 与第  $m$  个 C-VUE 之间的距离。

同样地, 第  $l$  个 D-VUE 对和 RIS 之间的信道增益分别表示为  $\mathbf{H}_{l,r} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  和  $\mathbf{H}_{r,l} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ , 从 BS 到第  $l$  个 D-VUE 对的信道增益为  $H_{b,l}$ , 第  $l$  个 D-VUE 对和第  $m$  个 C-VUE 之间的信道增益为  $H_{l,m}$ , 第  $l$  个 D-VUE 对之间的信道增益为  $H_l$ 。

由于车辆通信的高移动性, 在实际应用中很难获得瞬时 CSI 的准确估计。由于资源分配是由几个连续时隙组成的时间块, 而信道的大尺度衰落通常由车辆位置决定, 并且车辆位置在一个时间块内不太可能发生显著变化, 因此假设它们在一个时间块内是固定的。就 NLOS 分量 (即小尺度衰落) 而言, 本文假设它在一个时隙内是恒定的, 但在不同时隙之间独立变化。同时, 本文假设 BS 知道所有信道的 CSI<sup>[7-8]</sup>。

RIS 反射系数矩阵表示为

$$\Theta = \text{diag}(\beta_1 e^{j\theta_1}, \beta_2 e^{j\theta_2}, \dots, \beta_N e^{j\theta_N}) \quad (2)$$

其中,  $\theta_n \in [0, 2\pi)$  和  $\beta_n \in [0, 1]$  分别表示第  $n$  个反射元件的相移和振幅反射系数, 相移通常从有限数量的离散值中选择, 离散值范围为  $[0, 2\pi)^{[14]}$ , 而在实际中要使 RIS 反射信号最大化, 故本文将振幅固定设为 1。

由此, 第  $m$  个 C-VUE 和第  $l$  个 D-VUE 对的接收信号分别表示为

$$y_m = \sqrt{P_m} (\mathbf{H}_{r,m}^H \Theta \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,m}) s_m + \sum_{l \in L} x_{m,l} \sqrt{P_l} (\mathbf{H}_{r,m}^H \Theta \mathbf{H}_{l,r} + H_{l,m}) s_l + n_m \quad (3)$$

$$y_l = \sqrt{P_l} (\mathbf{H}_{r,l}^H \Theta \mathbf{H}_{l,r} + H_l) s_l + \sum_{m \in M} x_{m,l} \sqrt{P_m} (\mathbf{H}_{r,l}^H \Theta \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,l}) s_m + n_l \quad (4)$$

其中,  $s_m, P_m, s_l, P_l$  分别表示 BS 给第  $m$  个 C-VUE 的发射信息符号和发射功率以及第  $l$  个 D-VUE 对的发射信息符号和发射功率,  $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_M]^T$  表示噪声矢量, 其中  $n_m \sim N(0, \sigma^2), m \in \mathcal{M}$ ,  $n_l$  的定义与之类似。使用二进制变量  $x_{m,l} \in \{0, 1\}$  表示频谱分配指示符,  $x_{m,l} = 1$  表示第  $l$  个 D-VUE 对共享了第  $m$  个 C-VUE 的频谱, 否则  $x_{m,l} = 0$ 。

第  $m$  个 C-VUE 的下行链路信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 和第  $l$  个

D-VUE 对接收器的 SINR 分别可以表示为

$$\gamma_m = \frac{P_m \left| \mathbf{H}_{r,m}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,m} \right|^2}{\sum_{l \in \mathcal{L}} x_{m,l} P_l \left| \mathbf{H}_{r,m}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} + H_{l,m} \right|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

$$\gamma_l = \frac{P_l \left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} + H_l \right|^2}{\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{m,l} P_m \left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,l} \right|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

本文研究的信道容量为在给定信道条件下的传输速率，在这个情况下，信道容量仅与信道特性有关，而与带宽无关。为了便于分析，本文采用单位带宽设置，所以将第  $m$  个 C-VUE 和第  $l$  个 D-VUE 可以实现的下行链路容量分别表示为

$$\begin{aligned} R_m &= \text{lb}(1 + \gamma_m) \\ R_l &= \text{lb}(1 + \gamma_l) \end{aligned} \quad (7)$$

由于 V2I 链路的主要目的是支持高数据率活动，而 V2V 链路主要用于安全关键消息的可靠传播，因此，本文考虑在保证 V2V 的可靠性条件下最大化 V2I 系统总容量。本文使用中断概率来确保 V2V 链路的可靠性，定义为  $\Pr(R_l \leq R_0^d) \leq p, \forall l \in \mathcal{L}$ ，其中， $R_0^d$  是每个 V2V 链路所需的最小可靠传输速率， $p$  是最大容许中断概率。

在此基础上，本文研究的 RIS 辅助车联网资源分配问题可以转换为反射系数矩阵  $\boldsymbol{\Theta}$ 、功率分配  $\mathbf{P} = \{P_m, P_l, \forall m, l\}$  和频谱共享  $\mathbf{X} = \{x_{m,l}, \forall m, l\}$  的联合优化问题，具体问题表示如下

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mathbf{P}, \mathbf{X}, \boldsymbol{\Theta}\}} \sum_{m \in \mathcal{M}} R_m \\ \text{s.t. } & C_1 : x_{m,l} \in \{0, 1\}, \forall m, l \\ & C_2 : \Pr(R_l \leq R_0^d) \leq p, \forall l \in \mathcal{L} \\ & C_3 : R_m \geq R_0^c, \forall m \in \mathcal{M} \\ & C_4 : 0 \leq P_m \leq P_{\max}^m, \forall m \in \mathcal{M} \\ & C_5 : 0 \leq P_l \leq P_{\max}^l, \forall l \in \mathcal{L} \\ & C_6 : |\boldsymbol{\Theta}_{nm}| \leq 1, \forall n \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $C_1$  表示 C-VUE 的频带最多只能由一个 D-VUE 对重用， $C_2$  表示 V2V 链路的可靠性约束， $C_3$  表示 V2I 链路的最小容量要求， $C_4$  和  $C_5$  表示每个 VUE 的传输功率不超过最大值， $C_6$  表示 RIS 的反射系数矩阵约束。

## 2 V2V 链路中断分析

为了考虑 V2V 通信的可靠性要求，本文使用中断概率作为性能指标，但由于其概率约束的分析公式不适用于优化和资源分配，为了避免此问题，本文借鉴文献[15]中 Jensen 不等式的思想对 V2V 可靠性约束进行近似。

利用阶跃函数的平滑近似将约束  $C_2$  重写为

$$\Pr\{\text{lb}(1 + \gamma_l) \leq R_0^d\} = \mathbb{E}\left\{\varepsilon\left(R_0^d - \text{lb}(1 + \gamma_l)\right)\right\} \quad (9)$$

其中， $\varepsilon(\cdot)$  表示阶跃函数，通过  $\varepsilon_\delta(z) = (1 + e^{-\delta z})^{-1}$  作为阶跃函数的光滑近似，平滑参数  $\delta$  用于控制平滑误差。

利用阶跃函数和对数函数的凹性和 Jensen 不等式，将式(9)转换为

$$\mathbb{E}\left\{\varepsilon_\delta\left(R_0^d - \text{lb}(1 + \gamma_l)\right)\right\} \leq \varepsilon_\delta\left\{R_0^d - \text{lb}(1 + \mathbb{E}(\gamma_l))\right\} \quad (10)$$

可以得到

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\gamma_l) &= \mathbb{E}\left\{\frac{P_l \left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} + H_l \right|^2}{\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{m,l} P_m \left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,l} \right|^2 + \sigma^2}\right\} \approx \\ & \frac{P_l \mathbb{E}\left\{\left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} + H_l \right|^2\right\}}{\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{m,l} P_m \mathbb{E}\left\{\left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,l} \right|^2\right\} + \sigma^2} \end{aligned} \quad (11)$$

假设  $\mathbf{H}_{l,r}$ 、 $H_l$  以及  $\mathbf{H}_{r,l}$ 、 $\mathbf{H}_{b,r}$ 、 $H_{b,l}$  彼此之间相互独立，将式(11)的分子和分母分别展开后利用中心极限定理<sup>[11]</sup>可以得到

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\left\{\left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} + H_l \right|^2\right\} &= K_{r,l} K_{l,r} \Gamma_1 \left| \left( \mathbf{H}_{l,r}^{\text{LOS}} \right)^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{r,l}^{\text{LOS}} \right|^2 + \xi_1 \\ \mathbb{E}\left\{\left| \mathbf{H}_{r,l}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,l} \right|^2\right\} &= K_{r,l} K_{b,r} \Gamma_2 \left| \left( \mathbf{H}_{r,l}^{\text{LOS}} \right)^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r}^{\text{LOS}} \right|^2 + \xi_2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \Gamma_1 (NK_{r,l} + NK_{l,r} + N) + \text{PL}_{l,r}^2 \\ \xi_2 &= \Gamma_2 (NK_{r,l} + NK_{b,r} + N) + \text{PL}_{b,l}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{(\text{PL}_{r,l} \text{PL}_{l,r})^2}{(1 + K_{r,l})(1 + K_{l,r})} \\ \Gamma_2 &= \frac{(\text{PL}_{r,l} \text{PL}_{b,r})^2}{(1 + K_{r,l})(1 + K_{b,r})} \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $PL_{x,y} = \sqrt{\rho d_{x,y}^{-\alpha_{x,y}}}$  表示  $x$  和  $y$  之间的路径损耗。

可以得到

$$\varepsilon_\delta \left( R_0^d - \text{lb}(1 + \tilde{\gamma}_l(\mathbf{P}, \boldsymbol{\Theta}, \mathbf{X})) \right) \leq p \quad (15)$$

其中

$$\tilde{\gamma}_l(\mathbf{P}, \boldsymbol{\Theta}, \mathbf{X}) = \frac{P_l \left[ K_{r,l} K_{l,r} \Gamma_1 \left| \left( \mathbf{H}_{l,r}^{\text{LOS}} \right)^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{r,l}^{\text{LOS}} \right|^2 + \xi_1 \right]}{\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{m,l} P_m \left[ K_{r,l} K_{b,r} \Gamma_2 \left| \left( \mathbf{H}_{r,l}^{\text{LOS}} \right)^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r}^{\text{LOS}} \right|^2 + \xi_2 \right] + \sigma^2} \quad (16)$$

由式(15)可以得到

$$\tilde{\gamma}_l(\mathbf{P}, \boldsymbol{\Theta}, \mathbf{X}) \geq 2^{\frac{R_0^d + \frac{1}{\delta} \ln \left( \frac{1}{p} - 1 \right)}{\delta}} - 1 \triangleq \tilde{\gamma}_l^{l,b} \quad (17)$$

故可以将问题式(8)改写为

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mathbf{P}, \mathbf{X}, \boldsymbol{\Theta}\}} \sum_{m \in \mathcal{M}} R_m \\ & \text{s.t. } C_1, C_3, C_4, C_5, C_6 \\ & \tilde{C}_1: \tilde{\gamma}_l(\mathbf{P}, \boldsymbol{\Theta}, \mathbf{X}) \geq \tilde{\gamma}_l^{l,b} \end{aligned} \quad (18)$$

### 3 优化算法

由于式(18)优化目标中有 3 个相互耦合且非凸的变量, 难以用传统的凸优化方法直接求解, 为解决这一问题, 本文使用 BCD 将原问题解耦为 3 个易于解决的子问题来进行求解。

#### 3.1 RIS 反射系数矩阵优化

本节固定变量  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{X}$ , 将问题式(18)转换为关于变量  $\boldsymbol{\Theta}$  的子问题, 即

$$\begin{aligned} & \max_{\{\boldsymbol{\Theta}\}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \text{lb}(1 + \gamma_m(\boldsymbol{\Theta})) \\ & \text{s.t. } C_6 \end{aligned} \quad (19)$$

由于目标函数的非凸性, 本节使用 SCA 方法<sup>[16]</sup>来解决 RIS 反射系数矩阵的设计子问题。

针对问题式(19)中的  $\gamma_m(\boldsymbol{\Theta})$ , 先将式(5)分子中组合信道增益改写为

$$\left| \mathbf{H}_{r,m}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{b,r} + H_{b,m} \right|^2 = \left| \mathbf{z} \boldsymbol{\Phi} + H_{b,m} \right|^2 = G_{b,m} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Phi} &= \left( \beta_1 e^{j\theta_1}, \beta_2 e^{j\theta_2}, \dots, \beta_N e^{j\theta_N} \right)^T \\ \mathbf{z} &= \mathbf{H}_{r,m}^H \text{diag}(\mathbf{H}_{b,r}) \end{aligned} \quad (21)$$

松弛变量  $\zeta = \{\zeta_m = \text{Re}(\mathbf{z} \boldsymbol{\Phi} + H_{b,m}), \forall m\}$ ,  $\xi = \{\xi_m = \text{Im}(\mathbf{z} \boldsymbol{\Phi} + H_{b,m}), \forall m\}$ 。

显然,  $G_{b,m}$  对  $\boldsymbol{\Phi}$  来说不是一个凸问题。为了解决此非凸问题, 可以在每次迭代中应用 SCA, 对于给定的局部点  $(\zeta_m^{(t)}, \xi_m^{(t)})$ , 根据一阶泰勒展开, 可以找到  $\zeta_m^2 + \xi_m^2$  的下界, 用  $\Psi_m$  表示

$$\begin{aligned} \zeta_m^2 + \xi_m^2 &\geq (\zeta_m^{(t)})^2 + (\xi_m^{(t)})^2 + \\ &2\zeta_m^{(t)}(\zeta_m - \zeta_m^{(t)}) + 2\xi_m^{(t)}(\xi_m - \xi_m^{(t)}) = \Psi_m \end{aligned} \quad (22)$$

针对式(5)分母中的组合信道增益  $G_{l,m}$ , 可以得到它的上界, 表示为

$$\begin{aligned} G_{l,m} &= \left| \mathbf{H}_{r,m}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} + H_{l,m} \right|^2 = \\ & \left| \mathbf{H}_{r,m}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} \right|^2 + \left| H_{l,m} \right|^2 + 2 \left| \mathbf{H}_{r,m}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r} \right| \left| H_{l,m} \right| \cdot \\ & \cos \left[ \arg(H_{l,m}) - \arg(\mathbf{H}_{r,m}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{l,r}) \right] \leq \\ & \left| \sum_{n=1}^N \left| \mathbf{H}_{r,m}[n] \right| \left| \mathbf{H}_{l,r}[n] \right| + \left| H_{l,m} \right| \right|^2 \end{aligned} \quad (23)$$

为了方便计算, 利用中心极限定理可以近似得到

$$\kappa_{l,m} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \left| \mathbf{H}_{r,m}[n] \right| \left| \mathbf{H}_{l,r}[n] \right| \right|}{\left| H_{l,m} \right|} = N \frac{\bar{\mathbf{H}}_{r,m} \bar{\mathbf{H}}_{l,r}}{\left| H_{l,m} \right|} \quad (24)$$

其中,  $\bar{\mathbf{H}}_{r,m}$  和  $\bar{\mathbf{H}}_{l,r}$  分别是  $\mathbf{H}_{r,m}$  和  $\mathbf{H}_{l,r}$  的均值, 故有

$$G_{l,m} \leq (1 + \kappa_{l,m})^2 \left| H_{l,m} \right|^2 \triangleq G_{l,m}^{u,b} \quad (25)$$

显然

$$\gamma_m(\boldsymbol{\Theta}) \geq \frac{P_m \Psi_m}{\sum_{l \in \mathcal{L}} x_{m,l} P_l G_{l,m}^{u,b} + \sigma^2} \triangleq \gamma_m^{l,b} \quad (26)$$

将式(26)代入式(19)中, 可以将问题进一步表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\{\boldsymbol{\Phi}\}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \text{lb}(1 + \gamma_m^{l,b}) \\ & \text{s.t. } \tilde{C}_2: \left| \boldsymbol{\Phi}_n \right| \leq 1, \forall n \end{aligned} \quad (27)$$

上述问题是一个凸问题，可以使用 MATLAB 凸优化工具箱 CVX 有效求解。

### 3.2 功率和频谱共享优化

求解式(27)得到 RIS 反射系数矩阵  $\Theta$  后，式(18)中关于变量  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{X}$  的子问题可以构建为

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{P}, \mathbf{X}\}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{m,l} \text{lb}(1 + \gamma_m) \\ \text{s.t. } \tilde{\mathbf{C}}_1, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_3, \mathbf{C}_4, \mathbf{C}_5 \end{aligned} \quad (28)$$

式(28)中存在 2 个变量的乘积，此问题仍然是一个混合非凸问题，为解决这一问题，本文考虑先求解单对 C-VUE 和 D-VUE 共享频谱时的功率优化问题，再根据其容量来决定频谱共享方案。故将功率优化问题转换为以下问题

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{P}\}} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_m G_{b,m}}{P_l G_{l,m} + \sigma^2} \right) \\ \text{s.t. } \tilde{\mathbf{C}}_1, \mathbf{C}_4, \mathbf{C}_5 \end{aligned} \quad (29)$$

此问题中目标函数以及约束  $\tilde{\mathbf{C}}_1$  均是非凸的，所以对功率的优化问题同样可以使用和 RIS 反射系数矩阵优化相似的 SCA 方法求解。

利用对数性质将式(29)中问题转换为

$$\text{lb} \left( 1 + \frac{P_m G_{b,m}}{P_l G_{l,m} + \sigma^2} \right) = h_m(\mathbf{P}) - f_m(\mathbf{P}) \quad (30)$$

其中

$$\begin{aligned} h_m(\mathbf{P}) &= \text{lb}(P_m G_{b,m} + P_l G_{l,m} + \sigma^2) \\ f_m(\mathbf{P}) &= \text{lb}(P_l G_{l,m} + \sigma^2) \end{aligned} \quad (31)$$

同样对于约束  $\tilde{\mathbf{C}}_1$  可以写为

$$\text{lb}(1 + \tilde{\gamma}_l(\mathbf{P})) = h_l(\mathbf{P}) - f_l(\mathbf{P}) \quad (32)$$

其中

$$\begin{aligned} h_l(\mathbf{P}) &= \text{lb}(P_l \tilde{G}_l + P_m \tilde{G}_{l,b} + \sigma^2) \\ f_l(\mathbf{P}) &= \text{lb}(P_m \tilde{G}_{l,b} + \sigma^2) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \tilde{G}_l &= K_{r,l} K_{l,r} \Gamma_1 \left| \left( \mathbf{H}_{l,r}^{\text{LOS}} \right)^H \Theta \mathbf{H}_{r,l}^{\text{LOS}} \right|^2 + \xi_1 \\ \tilde{G}_{l,b} &= K_{r,l} K_{b,r} \Gamma_2 \left| \left( \mathbf{H}_{r,l}^{\text{LOS}} \right)^H \Theta \mathbf{H}_{b,r}^{\text{LOS}} \right|^2 + \xi_2 \end{aligned} \quad (34)$$

将式(31)~式(34)代入问题式(30)中，将问题

转换为 2 个凸函数之差，但仍不能保证其整体是凸函数，故使用一阶凸近似将目标函数和约束  $\tilde{\mathbf{C}}_1$  转换为凸问题后求解， $f_m(P_l)$  和  $f_l(P_m)$  的一阶导数可以表示为

$$\begin{aligned} \nabla f_m &= \frac{df_m(P_l)}{dP_l} = \frac{G_{l,m}}{(P_l G_{l,m} + \sigma^2) \ln 2} \\ \nabla f_l &= \frac{df_l(P_m)}{dP_m} = \frac{\tilde{G}_{l,b}}{(P_m \tilde{G}_{l,b} + \sigma^2) \ln 2} \end{aligned} \quad (35)$$

使用一阶泰勒展开式逼近  $f_m(\mathbf{P})$  和  $f_l(\mathbf{P})$ ，代入式(29)可以转换为

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{P}\}} h_m(\mathbf{P}) - f_m(\mathbf{P}^{(l)}) - \nabla f_m(\mathbf{P}^{(l)})(\mathbf{P} - \mathbf{P}^{(l)}) \\ \text{s.t. } \mathbf{C}_4, \mathbf{C}_5 \\ \tilde{\mathbf{C}}_5 : h_l(\mathbf{P}) - f_l(\mathbf{P}^{(l)}) - \nabla f_l(\mathbf{P}^{(l)})(\mathbf{P} - \mathbf{P}^{(l)}) \geq \\ R_0^d + \delta^{-1} \ln \left( \frac{1}{P} - 1 \right) \end{aligned} \quad (36)$$

上述问题是一个标准的凸优化问题，可以通过凸优化工具包 CVX 有效求解，从而得到第  $l$  个 D-VUE 对共享第  $m$  个 C-VUE 频谱时的最优功率分配方案以及优化后的 C-VUE 系统容量  $R_{m,l}$ 。

如果优化后 V2I 链路系统吞吐量不满足约束  $\mathbf{C}_5$ ，这样的 C-VUE 和 D-VUE 对不能满足 V2I 链路最小容量的要求，将其设置为  $-\infty$ 。

在计算得到所有 D-VUE 和 C-VUE 对共享频谱的最佳功率分配后，资源分配问题可以化简为

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{X}\}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{m,l} R_{m,l}^* \\ \text{s.t. } \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_3 \\ \tilde{\mathbf{C}}_6 : R_{m,l}^* = \begin{cases} R_{m,l} & , R_{m,l} \geq R_0^c \\ -\infty & , \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (37)$$

这是一个求最大权重的二部图匹配问题，可以利用匈牙利算法<sup>[17]</sup>有效求解得到最佳频谱分配方案。

### 3.3 算法设计

基于 SCA 的迭代功率分配算法如算法 1 所示，RIS 反射系数矩阵优化算法与算法 1 类似。基于 BCD 的 RIS 辅助车联网资源分配算法如算法 2 所示。

**算法 1** 基于 SCA 的迭代功率分配算法

**初始化** 功率  $\mathbf{P}^{(0)}$ ，设置最大迭代次数  $L_{\max}$ ，收敛精度  $\mu$ ，迭代次数  $t = 0$

1) 循环

- 2) 根据式(36)获得功率分配  $\mathbf{P}^{(t+1)}$ ;
- 3) 由  $C_m^{t+1} = \text{lb} \left( 1 + \frac{P_m G_{b,m}}{P_l G_{l,m} + \sigma^2} \right)$  计算得到此 C-VUE 的容量  $C_m^{t+1}$ ;
- 4) if  $|C_m^{t+1} - C_m^t| \leq \mu$  或  $t = L_{\max}$ , 跳出循环并输出  $\mathbf{P}^{(t)}$ ;
- 5) else 迭代次数  $t=t+1$ , 利用  $\mathbf{P}^{(t+1)}$  代替  $\mathbf{P}^{(t)}$  继续循环
- 6) end if

**算法 2** 基于 BCD 的 RIS 辅助车联网资源分配算法

初始化 RIS 反射系数  $\Theta^{(0)}$ , 功率  $\mathbf{P}^{(0)}$ , 频谱分配  $\mathbf{X}^{(0)}$ , 设置最大迭代次数  $L_{\max}$ , 收敛精度  $\mu$ , 迭代次数  $t = 0$

- 1) 循环
- 2) 迭代次数  $t=t+1$ ;
- 3) 根据式(27), 由  $\Theta^{(t-1)}$ 、 $\mathbf{P}^{(t-1)}$ 、 $\mathbf{X}^{(t-1)}$  获得 RIS 反射系数矩阵  $\Theta^{(t)}$ ;
- 4) 根据式(36)得到单对 D-VUE 和 C-VUE 共享频谱时的最佳功率分配  $\mathbf{P}^{(t)}$ 和系统容量  $R_{m,l}$ ;
- 5) 根据  $R_{m,l}$ , 通过求解问题式(37)后利用匈牙利算法得到最佳频谱分配方案  $\mathbf{X}^{(t)}$ , 从而得到第  $t$  轮优化结果  $R_m^t$
- 6) until  $\left| \sum_{m \in \mathcal{M}} R_m^t - \sum_{m \in \mathcal{M}} R_m^{t-1} \right| \leq \mu$  或  $t = L_{\max}$ ;
- 7) 结束并输出结果

## 4 计算复杂度及收敛性分析

### 4.1 计算复杂度分析

本文算法复杂度主要由算法 2 中步骤 3)~步骤 5) 决定, 其中, 步骤 3)和步骤 4)利用 CVX 中的非线性凸优化内点法进行求解, 其复杂度分别为  $O(T_1(ML)^{3.5})$  和  $O(T_2(ML)^{3.5})$ , 其中  $T_1$  和  $T_2$  分别是步骤 3)和步骤 4)中 SCA 过程的逼近次数。假设  $M \geq L$ , 那么步骤 5)中匈牙利算法的复杂度可以表示为  $O(M^3)$ 。综上所述, 本文算法的总复杂度为

$$O \left\{ ((T_1 + T_2)(ML)^{3.5} + M^3) \ln \left( \frac{1}{\mu} \right) \right\}.$$

### 4.2 收敛性分析

设算法 2 中第  $t$  轮迭代所得优化问题目标函数值为  $Z(\Theta^{(t)}, \mathbf{P}^{(t)}, \mathbf{X}^{(t)})$ , 故有

$$\begin{aligned} Z(\Theta^{(t)}, \mathbf{P}^{(t)}, \mathbf{X}^{(t)}) &\stackrel{(a)}{\leq} \\ Z(\Theta^{(t+1)}, \mathbf{P}^{(t)}, \mathbf{X}^{(t)}) &\stackrel{(b)}{\leq} \\ Z(\Theta^{(t+1)}, \mathbf{P}^{(t+1)}, \mathbf{X}^{(t)}) &\stackrel{(c)}{\leq} \\ Z(\Theta^{(t+1)}, \mathbf{P}^{(t+1)}, \mathbf{X}^{(t+1)}) & \end{aligned} \quad (38)$$

其中, 不等式(a)、(b)、(c)成立的条件在于本文所述 3 个子问题都能找到最优解, 从而保证目标函数是单调非递减的, 并且目标函数显然是有界的, 因此, 本文算法能够保证收敛。

## 5 仿真分析

本节给出数值结果以验证本文算法性能, 根据 3GPP TR 36.885<sup>[18]</sup>中详述的高速公路模拟设置, 多车道高速公路通过单个小区, BS 位于小区中心, 覆盖半径为 500 m。本文建模一个双向六车道的高速公路, 每条车道宽 4 m, 车辆根据空间泊松过程分布在道路上, 车辆密度取决于车辆速度。在系统设置上<sup>[19]</sup>, BS 坐标为(0,0,25), RIS 坐标为(50,0,25), 车辆之间平均距离为  $2.5v$  m ( $v$  为车辆的绝对速度, 单位为 m/s), 载频  $f = 2$  GHz, 基站到 VUE、基站到 RIS 和 RIS 到 VUE 的路径损耗指数分别为 3.5、1.5 和 2.2。其他参数设置如下:  $M=L=10$ ,  $N=50$ ,  $p=0.1$ ,  $P_{\max}^m = P_{\max}^l = 23$  dBm,  $R_0^c = R_0^d = 2.06$  bit / (s · Hz),  $\rho = -20$  dB,  $\sigma^2 = -144$  dBm,  $K_{b,r} = K_{r,m} = 3$  dB。

算法收敛性验证如图 2 所示。从图 2 可以看出, 随着迭代次数的增加, V2I 链路总容量迅速升高并最终收敛, 并且本文算法在经过几次迭代后就可以达到收敛, 说明本文算法具有良好的收敛性。

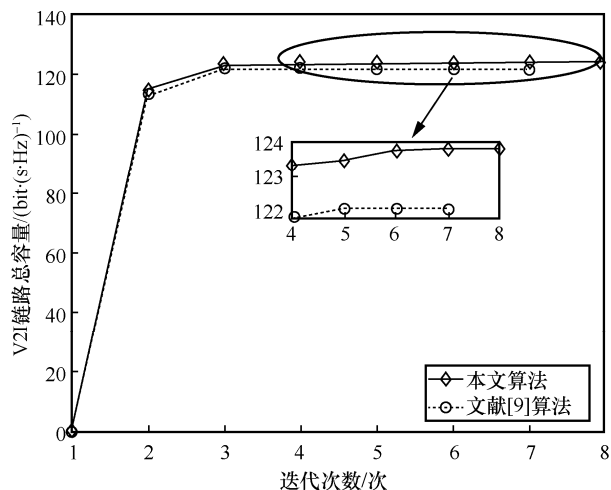


图 2 算法收敛性验证

V2I 链路总容量与 V2V 最大容许中断概率  $p$  的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出，随着中断概率的增大，V2I 链路总容量也随之增加，这是因为 V2V 链路更高的容许中断概率使其更能容忍来自 C-VUE 的干扰，即 V2V 链路需要满足的 SINR 要求越低，从而使 C-VUE 的发射功率增大，最后导致了 V2I 链路总容量的增加。

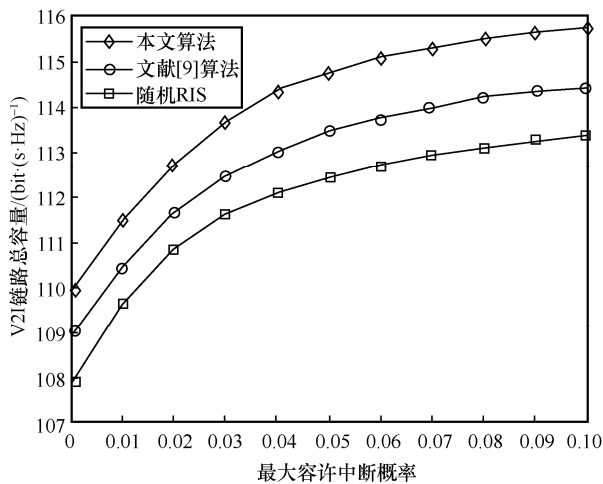


图 3 V2I 链路总容量与 V2V 最大容许中断概率  $p$  的关系

V2I 链路总容量与车辆速度之间的关系如图 4 所示。从图 4 可以看出，相比于文献[9]算法以及随机 RIS，本文算法显著提高了 V2I 链路总容量，并且随着车辆行驶速度的加快，总 C-VUE 容量会降低。这是因为当速度增大时，交通量减少，车辆之间的平均距离增加，此时为了保证 V2V 链路的 SINR，需要增加 D-VUE 链路的发射功率，以补偿 V2V 链路较大的路径损耗，因此，V2I 链路需要容忍来自 V2V 链路更大的干扰，从而限制了 V2I 链路总容量。

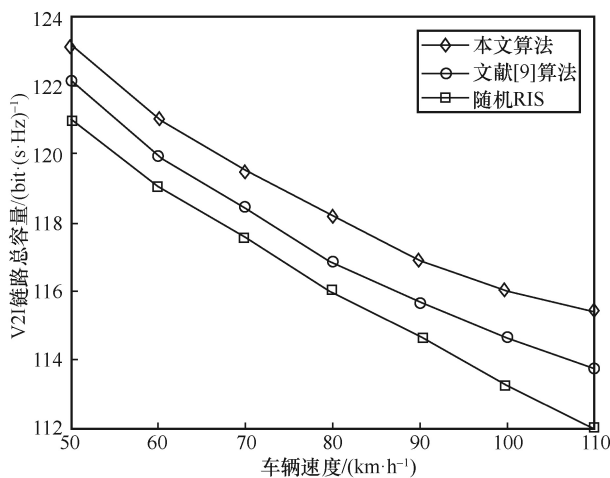


图 4 V2I 链路总容量与车辆速度之间的关系

V2I 链路总容量与 RIS 反射元件数  $N$  之间的关系如图 5 所示。从图 5 可以看出，V2I 链路总容量随着 RIS 反射元件数的增加而增加，所以增加 RIS 反射元件数能够有效地提升用户的服务体验。

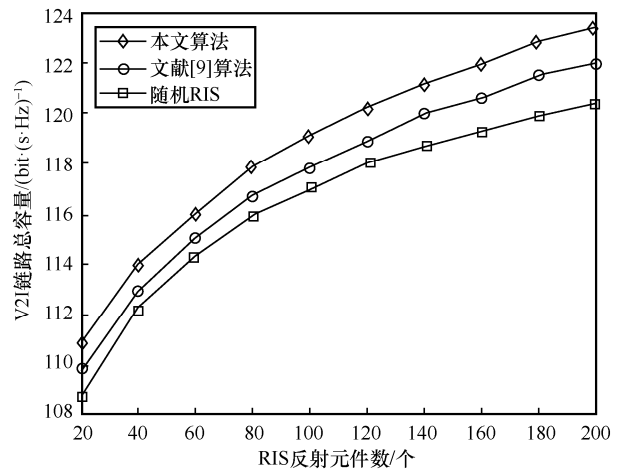


图 5 V2I 链路总容量与 RIS 反射元件数  $N$  之间的关系

## 6 结束语

本文研究了 RIS 辅助 IoV 的资源分配问题，在满足 V2V 用户可靠性需求的前提下，最大化 V2I 链路总容量。此外，建立一个多变量混合非凸问题，并通过 BCD 将其分为 3 个子问题进行求解。仿真结果表明，相比于其他算法，本文算法能够合理地分配和控制资源，更加显著地提升 V2I 链路的整体性能。

## 参考文献：

- [1] JAMEEL F, WYNE S, NAWAZ S J, et al. Propagation channels for mmWave vehicular communications: state-of-the-art and future research directions[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 144-150.
- [2] CHEN Y B, WANG Y, WANG Z C. Reconfigurable intelligent surface aided high-mobility millimeter wave communications with dynamic dual-structured sparsity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(7): 4580-4599.
- [3] CHEN Y B, WANG Y, ZHANG J Y, et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS)-aided vehicular networks: their protocols, resource allocation, and performance[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2022, 17(2): 26-36.
- [4] ZHU Y S, MAO B M, KATO N. Intelligent reflecting surface in 6G vehicular communications: a survey[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2022, 3: 266-277.
- [5] YANG Y F, ZHANG S W, ZHANG R. IRS-enhanced OFDMA: joint

- resource allocation and passive beamforming optimization[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 760-764.
- [6] LONG H, CHEN M, YANG Z H, et al. Joint trajectory and passive beamforming design for secure UAV networks with RIS[C]// Proceedings of IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [7] SALHAB A M, SAMUH M H. Accurate performance analysis of reconfigurable intelligent surfaces over Rician fading channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(5): 1051-1055.
- [8] CHEN Y B, WANG Y, ZHANG J Y, et al. Resource allocation for intelligent reflecting surface aided vehicular communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12321-12326.
- [9] GU X H, DUAN W, ZHANG G A, et al. Socially aware V2X networks with RIS: joint resource optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(6): 6732-6737.
- [10] YANG L, MENG F X, WU Q Q, et al. Accurate closed-form approximations to channel distributions of RIS-aided wireless systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1985-1989.
- [11] WANG J, ZHANG W C, BAO X, et al. Outage analysis for intelligent reflecting surface assisted vehicular communication networks[C]// Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [12] LIANG L, XIE S J, LI G Y, et al. Graph-based resource sharing in vehicular communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7): 4579-4592.
- [13] HAN Y, TANG W K, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8238-8242.
- [14] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [15] CHEN Y B, WANG Y, ZHANG J Y, et al. QoS-driven spectrum sharing for reconfigurable intelligent surfaces (RISs) aided vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 5969-5985.
- [16] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. New York: Cambridge, 2004.
- [17] 高随祥. 图论与网络流理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- GAO S X. Graph theory, network flow theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [18] 3GPP. Technical specification group radio access network: study on lte based V2X services: TR 36.885[S]. 2016.
- [19] GU X H, ZHANG G A, JI Y C, et al. Intelligent surface aided D2D-V2X system for low-latency and high-reliability communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(11): 11624-11636.

#### [作者简介]



陈发堂(1965-),男,重庆人,重庆邮电大学研究员、硕士生导师,主要研究方向为物理层算法、可重构智能反射面等。

张若凡(2001-),男,湖北荆州人,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为车联网物理层协议、可重构智能反射面等。