



专题：6G 智能超表面

H-CRAN 中 IRS 辅助的 D2D 系统资源分配与 RCG 波束成形优化

许晓荣, 薛纪守, 吴俊, 包建荣

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 以异构云无线电接入网 (heterogeneous cloud radio access network, H-CRAN) 中智能反射面 (intelligent reflecting surface, IRS) 辅助的端到端 (device-to-device, D2D) 通信系统为背景, 研究了该系统中以和速率最大化为目标的资源分配与黎曼共轭梯度 (Riemannian conjugate gradient, RCG) 波束成形优化方法。以最大化系统和速率为优化目标, 构造子信道复用系数、发射功率门限以及 IRS 反射系数模约束等多约束优化问题。对于该非线性混合整数规划问题, 提出了一种基于相对信道强度的延迟接受算法, 以获得信道复用系数。随后将目标优化问题分解为两个子问题进行交替优化。对于发射功率优化子问题, 使用逐次凸逼近 (successive convex approximation, SCA) 方法进行求解。对于 IRS 波束成形子问题, 将 IRS 相移约束转化为复圆流形后, 采用 RCG 算法进行求解。仿真结果表明, 当 IRS 反射阵源数为 50、基站最大发射功率为 46 dBm 时, 与现有信道分配方案和随机信道分配方案相比, 所提信道分配方案的和速率性能分别提高了 5.2 bit/(s·Hz) 和 14.6 bit/(s·Hz)。与无 IRS 通信场景相比, 部署 IRS 的和速率性能显著提高约 31.2 bit/(s·Hz)。

关键词: 智能反射面; 异构云无线电接入网; D2D 通信; 逐次凸逼近; 黎曼共轭梯度

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024191

IRS-assisted D2D system resource allocation and RCG beamforming optimization in H-CRAN

XU Xiaorong, XUE Jishou, WU Jun, BAO Jianrong

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Intelligent reflecting surface (IRS)-assisted device-to-device (D2D) communications in heterogeneous cloud radio access network (H-CRAN) were investigated as research background. Resource allocation and Riemannian conjugate gradient (RCG) beamforming optimization were studied, with the objective of system sum rate maximization. System sum rate was formulated as the optimization objective, which was subject to several constraint con-

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-07-15

通信作者: 包建荣, baojr@hdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62201186); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LZ24F010005, No.LQ22F010013)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62201186), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LZ24F010005, No.LQ22F010013)

ditions such as sub-channel reuse coefficient, transmit power threshold, as well as the modulus of the IRS reflection coefficient. To solve the formulated mixed-integer non-linear programming problem, a channel-strength-based deferred acceptance algorithm was proposed to obtain channel reuse indicators. The problem was then decomposed into two subproblems. For transmit power optimization subproblem, successive convex approximation (SCA) was used to solve it. For IRS beamforming optimization subproblem, the beamforming vector constraint was transformed into a complex circular manifold and Riemannian conjugate gradient (RCG) algorithm was implemented to solve it. Simulation results show that, when IRS reflecting elements is 50 and base station maximum transmit power is 46 dBm, compared with the existing channel allocation scheme and random channel allocation scheme, the proposed scheme enhances sum rate performance 5.2 bit/(s·Hz) and 14.6 bit/(s·Hz) respectively. Compared with the communication scenario without IRS, sum rate performance significantly promotes nearly 31.2 bit/(s·Hz) with the deployment of IRS.

Key words: intelligent reflecting surface, heterogeneous cloud radio access network, device-to-device communications, successive convex approximation, Riemannian conjugate gradient

0 引言

异构云无线电接入网 (heterogeneous cloud radio access network, H-CRAN) 架构结合了异构网络 (heterogeneous network, HetNet) 和云无线电接入网络 (cloud radio access network, C-RAN) 的优势, 通过高功率节点 (high power node, HPN) 传输整个网络的控制信号。无线远端射频单元 (remote radio head, RRH) 用于热点区域中的大容量数据传输, 并且通过前端链路将接收到的 RRH 用户 (RUE) 信号传入基带处理单元 (baseband processing unit, BBU)。BBU 池对接收到的信号进行大规模协同信号处理, 以抑制 RRH 之间的同层干扰。这种网络架构可以快速、灵活地部署网络节点, 当需要扩展网络容量或增加覆盖时, 只需要添加新的 RRH, 并通过光传输网络将其连接到云端的 BBU 池。当网络负载增加时, 只需要添加 BBU, 以增加整个网络系统的处理能力^[1]。这种方式充分利用了基于云计算的协作处理和网络增益, 降低了无线基础设施的能耗^[2-3]。同时, BBU 池的集中处理特性, 可以减少 H-CRAN 中的信息交换, 从而减少功耗和降低时延。然而, RRH 的密集部署将导致严重的干扰, 因此, 干扰管理是 H-CRAN 亟待解决的关键技术之一。

设备到设备 (device-to-device, D2D) 通信技术被认为是解决数据流量需求快速增长的一种有效方案^[4]。无线网络通常考虑两种 D2D 通信模式: 覆盖模式和底层模式^[5]。在覆盖模式下, 蜂窝用户和 D2D 对使用正交资源, 以避免相互干扰; 在底层模式下, D2D 对和蜂窝用户共享同一频谱, 以提高通信系统的频谱效率。因此, D2D 通信技术可以提高系统的频谱效率和能量效率, 同时降低系统时延^[6]。D2D 链路通常与蜂窝链路共享上行链路频谱, 从而缓解了频谱短缺问题。干扰管理和资源分配是底层模式下 D2D 通信的关键技术^[6]。

近年来, D2D 通信在 H-CRAN 领域的研究日渐深入。文献[7]将匹配理论应用于 H-CRAN 下的资源分配, 为实现最大系统吞吐量的目标, 使 D2D 对和 RUE 在满足用户服务质量 (quality of service, QoS) 的条件下复用宏蜂窝用户 (macro cellular user, MUE) 的频谱资源。文献[8]利用传统 HetNet 中的 D2D 通信, 考虑了一个三层次的 HetNet, 并对系统频谱效率进行了分析。

智能反射面 (intelligent reflecting surface, IRS) 技术可用于有效抑制 D2D 链路带来的干扰, 并在 IRS 辅助的 D2D 蜂窝系统中实现更高的数据传输速率^[9]。IRS 被认为是未来 6G 通信系统中具有前景广阔的无线通信技术之一。IRS 由多个可



重构无源反射元件构成的平面阵列组成,通过一个软件控制器实时控制各元件以达到调整入射电磁波的反射角和反射强度的目的,从而实现对反射信号的相位和幅度进行控制,使反射电磁波独立产生相移,形成满足差异化通信需求的三维无源波束。IRS作为一种无源智能中继,具有灵活控制入射电磁波的能力^[10]。因此,通过IRS形成的电磁场具有可控的振幅、相位、极化和频率^[11]。

文献[12]提出了一种双向链路资源分配方案,该方案采用非线性规划和匈牙利算法来最大化系统和速率性能。文献[13]将延迟接受算法用于解决D2D用户和蜂窝用户之间的下行链路资源分配问题。文献[14]研究了IRS辅助的D2D通信系统中一种基于信道强度的信道分配策略。文献[15]研究了单小区D2D蜂窝网络中谱效(spectral efficiency, SE)和能效(energy efficiency, EE)之间的折中。半正定松弛(semi-definite relaxation, SDR)是解决IRS无源波束成形的二次约束二次规划(quadratic constrained quadratic programming, QCQP)问题的一种常用方法^[16]。然而,变量的数量与SDR中IRS反射阵源的数量呈二次曲线增长,导致算法复杂度显著增加。文献[17]采用流形优化来解决波束成形问题并提出了黎曼共轭梯度(Riemannian conjugate gradient, RCG)算法,在大型IRS反射阵源场景中以适当的计算复杂度解决了相位优化问题。文献[18]针对IRS辅助多用户MIMO系统,研究采用最小干扰泄露(minimum interference leakage, MIL)准则和RCG算法的增强型干扰对齐策略。文献[19]将D2D通信技术引入H-CRAN中,D2D链路与RRH通过复用蜂窝用户的子信道进行通信,并将信道资源分配问题表述为匹配博弈,通过延迟接受算法进行双向匹配以提高系统吞吐量。然而,以上文献并未考虑IRS、H-CRAN与D2D通信技术相结合的通信新场景。此外,文献[14]中基于

信道强度的信道分配策略仅仅将有效信道增益与干扰信道增益之比作为信道分配的标准,没有将反射链路考虑在内。文献[19]将D2D通信技术引入H-CRAN中,系统吞吐量在增加的同时也引入了干扰,缺乏干扰管理措施。在文献[19]中的通信场景中存在多种类型的发射端与接收端,在引入IRS后又增加了反射链路,这使得通信链路十分复杂,同时优化过程涉及的变量包含了连续变量与离散变量,给目标函数的求解带来了挑战,没有现成的标准方法可直接应用。因此,如何合理分配系统资源、优化IRS反射相移向量以抑制复杂的干扰并且保证优化策略的复杂度在可接受的范围内是研究的难点。

本文首次将IRS与H-CRAN中的D2D通信场景相结合,在H-CRAN中D2D通信场景的基础上,采用IRS来抑制异构网络中RUE与D2D链路引入的干扰。本文提出了一种将反射链路考虑在内的、基于信道强度的延迟接受算法,用于解决异构信道资源分配问题。同时,采用计算复杂度较低的RCG算法优化IRS反射相移。利用D2D通信与IRS的优势,本文分析了H-CRAN中IRS辅助的D2D通信系统和速率最大化问题。本文研究了该场景下的资源分配问题,通过联合优化子信道复用系数、发射功率门限以及IRS反射系数模约束以最大化系统和速率。由于信道分配涉及整数规划,本文提出了一种基于相对信道强度的延迟接受算法求解信道复用系数,在获得信道配对结果下,将优化问题解耦为两个子问题,并进一步提出了基于交替优化、逐次凸逼近(successive convex approximation, SCA)与RCG的交替迭代算法。具体而言,两个子问题分别为发射功率优化子问题与IRS无源波束成形子问题。对于发射功率优化子问题,利用SCA逼近目标函数的下界并获得近似最优解。对于IRS波束成形子问题,则将IRS反射向量模约束转化为复圆流形并采用RCG算法求解。

1 H-CRAN 中 IRS 辅助的 D2D 通信系统模型

H-CRAN 中 IRS 辅助的 D2D 通信系统场景示意图如图 1 所示。其中, 存在 1 个 HPN、 R 个 RRH、 K 个 MUE、 N 个 D2D 对以及 1 个反射阵源数为 M 的 IRS。每个 RRH 中存在 1 个 RUE, 每个 D2D 对由发射用户 DT 与接收用户 DR 组成。HPN 预先为 MUE 分配信道资源, 为了解决信道资源短缺的问题, D2D 链路 with RRH 复用 MUE 的信道。IRS 的作用为增强通信信道强度, 同时抑制干扰。为减轻 IRS 引入反射链路的干扰, 假设 1 个 MUE 的信道资源只能共享给 1 个 D2D 链路或 RUE, 并且 1 个 D2D 链路

或 RUE 只能复用 1 个 MUE 的信道资源。所有的 D2D 对与 RUE 组成系统的底层用户, 底层用户的集合用 $I=\{1, \dots, I\}$ 表示, 其中, $I=R+N$, 并且有 $I=K$ 以保证每一个底层用户都能复用子信道进行通信。

假设已知统计信道状态信息, 在子信道 k 上, 从 HPN 到 MUE($k \in K$) 以及 IRS 的信道增益分别为 $h_k^H \in \mathbb{C}$ 与 $f_k^H \in \mathbb{C}^{M \times 1}$; 从 DT($n \in N$) 到 DR n 以及 IRS 的信道增益分别为 $h_{k,n}^D \in \mathbb{C}$ 与 $f_{k,n}^D \in \mathbb{C}^{M \times 1}$; 从 RRH($r \in \mathcal{R}$) 到 RUE r 以及 IRS 的信道增益分别为 $h_{k,r}^R \in \mathbb{C}$ 与 $f_{k,r}^R \in \mathbb{C}^{M \times 1}$; 从 IRS 到 MUE k 、DR n 以及 RUE r 的信道增益分别为 $g_k^M \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 、 $g_{k,n}^D \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 与 $g_{k,r}^R \in \mathbb{C}^{1 \times M}$; 从 HPN 到 DR n 以及

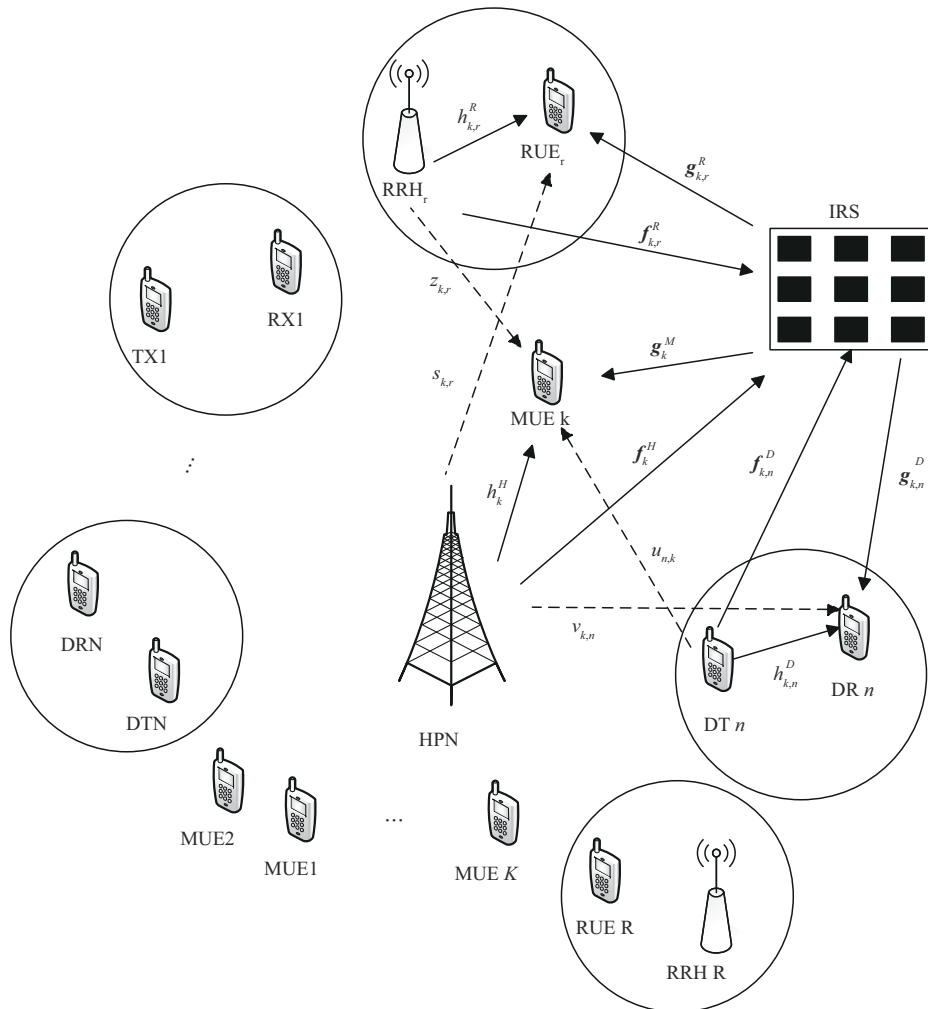


图 1 H-CRAN 中 IRS 辅助的 D2D 通信系统场景示意图



RUE r 的干扰信道增益分别用 $v_{k,n} \in \mathbb{C}$ 与 $s_{k,r} \in \mathbb{C}$ 表示；从DT n 到MUE k 以及从RRH r 到MUE k 的干扰信道增益分别用 $u_{n,k} \in \mathbb{C}$ 与 $z_{r,k} \in \mathbb{C}$ 表示。

考虑IRS相移矩阵为 $\Phi = \text{diag}\{\beta e^{j\theta_1}, \dots, \beta e^{j\theta_M}\}$ ，其中， $\beta e^{j\theta_m}$ 中 $\theta_m \in [0, 2\pi)$ ， $\forall m = 1, 2, \dots, M$ 表示第 m 个IRS反射阵源的反射系数相移。本模型中设置反射系数 $\beta = 1$ 以获得最大反射增益^[20]。 x_k^H 、 x_n^D 以及 x_r^R 分别代表HPN、DT n 与RRH r 的传输信号，它们服从循环对称复高斯（circularly symmetric complex Gaussian, CSCG）分布，即 $x \sim \text{CN}(0, 1)$ 。DR n 解码发送自DT n 的信号 x_n^D 得到的信干噪比（signal-to-interference plus noise ra-

tio, SINR）为：

$$\gamma_{k,n}^D = \sum_{k=1}^K \rho_{n,k}^D \frac{P_n^D |g_{k,n}^D \Phi f_{k,n}^D + h_{k,n}^D|^2}{P^H |g_{k,n}^D \Phi f_k^H + v_{k,n}|^2 + \sigma^2} \quad (1)$$

RUE r 解码发送自RRH r 的信号 x_r^R 得到的SINR为：

$$\gamma_{k,r}^R = \sum_{k=1}^K \rho_{r,k}^R \frac{P_r^R |g_{k,r}^R \Phi f_{k,r}^R + h_{k,r}^R|^2}{P^H |g_{k,r}^R \Phi f_k^H + s_{k,r}|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

MUE k 解码发送自HPN的信号 x_k^H 得到的SINR为：

$$\gamma_k^M = \frac{P^H |g_k^M \Phi f_k^H + h_k^H|^2}{\sum_{n=1}^N \rho_{n,k}^D P_n^D |g_{k,n}^D \Phi f_{k,n}^D + u_{n,k}|^2 + \sum_{r=1}^R \rho_{r,k}^R P_r^R |g_{k,r}^R \Phi f_{k,r}^R + z_{r,k}|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

其中， P_n^D 、 P_r^R 与 P^H 分别为DT n 、RUE r 以及HPN的发射功率， $\rho_{n,k}^D$ 与 $\rho_{r,k}^R$ 为信道复用系数，若第 n 对D2D链路复用了MUE k 的信道资源，则 $\rho_{n,k} = 1$ ，否则 $\rho_{n,k} = 0$ ， $\rho_{r,k}^R$ 类似。 σ^2 为接收端的加性白高斯噪声（additive white Gaussian noise, AWGN），其服从均值为0、方差为 σ^2 的循环对称复高斯分布。因此，构造的数学优化模型为：

$$(P1): \max_{\rho, P, \Phi} R(\rho, P, \Phi) = \sum_{n=1}^N \text{lb}(1 + \gamma_{k,n}^D) +$$

$$\sum_{r=1}^R \text{lb}(1 + \gamma_{k,r}^R) + \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \gamma_k^M) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_n^D \leq P_{\max}^D \quad (5)$$

$$0 \leq P_r^R \leq P_{\max}^R \quad (6)$$

$$0 \leq P^H \leq P_{\max}^H \quad (7)$$

$$\gamma_k^M \geq \gamma_{\min}^M \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{n,k}^D = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{r,k}^R = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N \rho_{n,k}^D + \sum_{r=1}^R \rho_{r,k}^R = 1 \quad (11)$$

$$\theta_m \in [0, 2\pi), 1 \leq m \leq M \quad (12)$$

其中， $\mathbf{P} = [P^H, P_1^D, \dots, P_N^D, P_1^R, \dots, P_R^R]^T$ ， $\boldsymbol{\rho} = [\rho_{1,1}, \dots, \rho_{1,K}, \rho_{2,1}, \dots, \rho_{N+R,K}]$ ， $P_{\max}^D$ 、 $P_{\max}^R$ 与 $P_{\max}^H$ 分别表示DT、RRH与HPN的最大发射功率， $\gamma_{\min}^M$ 为MUE的最小SINR门限。约束条件（9）与（10）表示一个D2D链路或RUE只能复用一个MUE的信道；约束条件（11）表示一个MUE的信道只能被一个RUE或一个D2D链路复用；约束条件（12）为IRS反射相移约束。

2 基于系统和速率最大化的资源分配与波束成形优化

2.1 基于相对信道强度的延迟接受匹配算法

$\boldsymbol{\rho}$ 的存在使问题（P1）为混合整数问题，预先获得 $\boldsymbol{\rho}$ 的解可以简化求解步骤。本文将子信道资源分配问题表述为一对一匹配博弈，并采用基于相对信道强度的延迟接受算法得到匹配结果，并将该匹配博弈的结果映射到 $\boldsymbol{\rho}$ 中。

定义1 μ 为底层用户 I 与子信道资源集合 K 之间的双向映射，使得：

$$(1) \forall i \in \mathcal{I}, \mu(v) \in \mathcal{K}, |\mu(v)| = 1$$

$$(2) \forall k \in \mathcal{K}, \mu(k) \in \mathcal{I}, |\mu(k)| = 1$$

根据定义1中的(1)和(2), μ 为一对一匹配。假设MUE与底层用户都是自私且理性的,那么匹配的过程即用户的决策过程可以被公式化为一个博弈。底层用户 $i \in \mathcal{I}$ 会选择一个有效信道增益大且干扰信道增益小的子信道,将底层用户 i 在子信道 k 上的效用函数定义为有效信道增益与干扰信道增益的比:

$$U_{k,i}^I = \frac{|\mathbf{g}_{k,i}^I \Phi \mathbf{f}_{k,i}^I + h_{k,i}^I|^2}{|\mathbf{g}_{k,i}^I \Phi \mathbf{f}_k^H + I_{h,i}^I|^2} \quad (13)$$

其中, $h_{k,i}^I$ 为 $h_{k,i}^D$ 或 $h_{k,i}^R$, $\mathbf{g}_{k,i}^I$ 为 $\mathbf{g}_{k,i}^D$ 或 $\mathbf{g}_{k,i}^R$, $\mathbf{f}_{k,i}^I$ 为 $\mathbf{f}_{k,i}^D$ 或 $\mathbf{f}_{k,i}^R$, $I_{h,i}^I$ 为 $v_{k,i}$ 或 $s_{k,i}$ 。

子信道 k 也倾向于选择有效信道增益大且干扰信道增益小的底层用户进行信道分享,因此,子信道 k 被底层用户 i 复用时的效用函数为:

$$U_{k,i}^K = \frac{|\mathbf{g}_k^M \Phi \mathbf{f}_k^H + h_k^H|^2}{|\mathbf{g}_k^M \Phi \mathbf{f}_{k,i}^I + I_{i,k}^K|^2} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{f}_{k,i}^I$ 为 $\mathbf{f}_{k,i}^D$ 或 $\mathbf{f}_{k,i}^R$, $I_{i,k}^K$ 为 $u_{i,k}$ 或 $z_{i,k}$ 。

定义2 $\succ$ 为偏好关系,在子信道集合 $\mathcal{K}$ 上定义偏好关系,任意两个子信道 $k_1, k_2 \in \mathcal{K}, k_1 \neq k_2$,使得:

$$k_1 \succ_i k_2 \Leftrightarrow U_{k_1,i}^K > U_{k_2,i}^K$$

在底层用户集合 $\mathcal{I}$ 上,任意两个底层用户 $i_1, i_2 \in \mathcal{I}, i_1 \neq i_2$,使得:

$$i_1 \succ_k i_2 \Leftrightarrow U_{k,i_1}^I > U_{k,i_2}^I$$

通过HPN广播偏好关系与其他必要的信息,底层用户与MUE可以建立偏好信息,因此,信道资源分配问题可以公式化为一对一匹配博弈问题。

定义3 将 $G(\mu, \mathcal{I} \times \mathcal{K})$ 定义为由玩家 $\mathcal{I}$ 与 $\mathcal{K}$ 以及偏好关系 $\succ_i$ 与 $\succ_k$ 组成的匹配博弈,每个参与者建立对彼此的偏好,最终产生匹配结果 $\mu^{[19]}$,

并将匹配结果映射到 ρ 中,基于相对信道强度的延迟接受匹配算法如算法1所示。

算法1 基于相对信道强度的延迟接受匹配算法

初始化: $\mathcal{I}, \mathcal{K}$, 偏好关系 $\succ_i, \succ_k$

输出: 底层用户与子信道的匹配

开始: 基于双方效用函数开始匹配

步骤1 构建偏好列表 L^I, L^K

底层用户根据效用函数的效益值构建偏好列表 L^I

子信道根据效用函数效益值构建偏好列表 L^K

底层用户根据 L^I 向首位子信道发出复用请求

子信道根据 L^K 对发出请求的底层用户排序,选择排名第一的底层用户进入延迟列表

步骤2 匹配过程

已关联的底层用户将被从偏好列表中删除

更新偏好列表 L^I ,被拒绝的底层用户进行下一轮匹配

子信道选择底层用户,若已配对则只接受优先级大于延迟列表中最低优先级的底层用户,并将最低优先级底层用户拒绝

更新偏好列表 L^I

until

所有底层用户与子信道得到匹配对象

2.2 发射功率优化

在得到 ρ 的解后,使用迭代交替优化的方式对发射功率与IRS相移向量进行优化。在第 j 次迭代中,给定IRS反射相移矩阵 $\Phi^{(j)}$,求解以下问题优化发射功率:

$$(P1.1): \max_{\mathbf{P}} R(\mathbf{P}) = \sum_{n=1}^N \text{lb}(1 + \gamma_{k,n}^D) +$$

$$\sum_{r=1}^R \text{lb}(1 + \gamma_{k,r}^R) + \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \gamma_k^M) \quad (15)$$

$$\text{s.t. 式(5), 式(6), 式(7), 式(8)} \quad (16)$$

将目标函数改写为:



$$\begin{aligned}
R = & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{n,k}^D [\text{lb}(P_n^D W_{k,n}^{D(j)} + A_1) - \text{lb} A_1] \\
& + \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K \rho_{r,k}^R [\text{lb}(P_r^R W_{k,r}^{R(j)} + A_2) - \text{lb} A_2] \\
& + \sum_{k=1}^K [\text{lb}(P^H W_k^{M(j)} + A_3) - \text{lb} A_3] \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{其中, } W_{k,n}^D = & \left| \mathbf{g}_{k,n}^D \Phi \mathbf{f}_{k,n}^D + h_{k,n}^D \right|^2, \quad C_{k,n}^D = \left| \mathbf{g}_{k,n}^D \Phi \mathbf{f}_k^H + \right. \\
& \left. v_{k,n} \right|^2, \quad C_{k,r}^R = \left| \mathbf{g}_{k,r}^R \Phi \mathbf{f}_k^H + s_{k,r} \right|^2, \quad W_{k,r}^R = \left| \mathbf{g}_{k,r}^R \Phi \mathbf{f}_{k,r}^R + \right. \\
& \left. h_{k,r}^R \right|^2, \quad W_k^M = \left| \mathbf{g}_k^M \Phi \mathbf{f}_k^H + h_k^H \right|^2, \quad Q_{n,k}^D = \left| \mathbf{g}_k^M \Phi \mathbf{f}_{k,n}^D + \right. \\
& \left. u_{n,k} \right|^2, \quad Q_{r,k}^R = \left| \mathbf{g}_k^M \Phi \mathbf{f}_{k,r}^R + z_{r,k} \right|^2, \quad A_1 = P^H C_{k,n}^{D(j)} + \sigma^2, \quad A_2 = \\
& P^H C_{k,r}^{R(j)} + \sigma^2, \quad A_3 = \sum_{n=1}^N \rho_{n,k}^D P_n^D Q_{n,k}^{D(j)} + \sum_{r=1}^R \rho_{r,k}^R P_r^R Q_{r,k}^{R(j)} + \sigma^2.
\end{aligned}$$

由于 $-\text{lb} A_1$ 、 $-\text{lb} A_2$ 、 $-\text{lb} A_3$ 的存在, 式 (17) 为非凸函数。利用逐次凸逼近^[21]解决问题 (P1.1)。具体来说, 需要找到一个凹下界去逼近目标函数, 而任何凸函数在任何点都可以通过一阶泰勒展开得到其下界, 在点 $\mathbf{P}^{(j)}$ 处获得目标函数的下界 R_l :

$$\begin{aligned}
R \geq & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K [\text{lb}(P_n^D W_{k,n}^{D(j)} + A_1) - \text{lb}(A_1^{(j)}) - \\
& \frac{1}{A_1^{(j)}} C_{k,n}^{D(j)} (P^H - P^{H(j)})] + \\
& \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K [\text{lb}(P_r^R W_{k,r}^{R(j)} + A_2) - \text{lb}(A_2^{(j)}) - \\
& \frac{1}{A_2^{(j)}} C_{k,r}^{R(j)} (P^H - P^{H(j)})] + \\
& \sum_{k=1}^K [\text{lb}(P^H W_k^{M(j)} + A_3) - \text{lb}(A_3^{(j)}) - \\
& \frac{1}{A_3^{(j)}} \sum_{n=1}^N \rho_{n,k} Q_{n,k}^{D(j)} (P_i^D - P_i^{D(j)}) - \\
& \frac{1}{A_3^{(j)}} \sum_{r=1}^R \rho_{r,k} Q_{r,k}^{R(j)} (P_r^R - P_r^{R(j)})] = R_l \quad (18)
\end{aligned}$$

在给定 $P^{(j)}$ 的情况下, (P1.1) 可近似为求解以下问题:

$$(P1.2): \max_{\mathbf{P}} R_l \quad (19)$$

$$\text{s.t. 式(5), 式(6), 式(7), 式(8)} \quad (20)$$

(P1.2) 可以通过 CVX 工具求解。

2.3 基于黎曼共轭梯度的 IRS 相移向量优化

在得到 $\mathbf{P}$ 与 ρ 的解后, 使用 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 替代 Φ 的对角元素, 即 $\Phi = \text{diag}(\mathbf{s})$, 问题 (P1) 中的约束条件 (12) 可以转化为 $|s(m)| = 1$, 其中, $m = 1, 2, \dots, M$, 将问题转化为以下形式。

$$(P1.3): \max_{\mathbf{s}} R(\mathbf{s}) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } |s(m)| = 1, m = 1, 2, \dots, M \quad (22)$$

可以看出, $R(\mathbf{s})$ 是连续且可微的, 并且 $\mathbf{s}$ 的约束集形成复圆流形。因此, (P1.3) 的解可以通过 RCG 算法得到^[22]。黎曼共轭梯度算法的 3 个关键步骤如下。

(1) 计算黎曼共轭梯度

黎曼共轭梯度是欧几里得梯度 ∇R 在复圆上的正交投影:

$$\text{grad } R = \nabla R - \text{Re} \{ \nabla R \circ \mathbf{s}^* \} \circ \mathbf{s} \quad (23)$$

目标函数的欧几里得梯度为:

$$\begin{aligned}
\nabla R = & \sum_{i \in I} \sum_{k=1}^K \rho_{i,k} \left(\frac{2P_i^I \mathbf{a}_{k,i} H_{k,i} + 2P^H \mathbf{b}_{k,i} F_{k,i}^I}{P_i^I (H_{k,i})^2 + P^H (F_{k,i}^I)^2 + \sigma^2} - \right. \\
& \left. \frac{2P^H \mathbf{b}_{k,i} F_{k,i}^I}{P^H (F_{k,i}^I)^2 + \sigma^2} \right) + \sum_{k=1}^K \sum_{i \in I} \rho_{i,k} \\
& \left(\frac{2P^H \mathbf{c}_k H_k^M + 2P_i^I \mathbf{d}_{i,k} F_{i,k}^M}{P^H (H_k^M)^2 + P_i^I (F_{i,k}^M)^2 + \sigma^2} - \frac{2P_i^I \mathbf{d}_{i,k} F_{i,k}^M}{P_i^I (F_{k,i}^I)^2 + \sigma^2} \right) \quad (24)
\end{aligned}$$

其中, $\mathbf{a}_{k,i} = \text{diag}(\mathbf{g}_{k,i}^I) \mathbf{f}_{k,i}^I$, $\mathbf{b}_{k,i} = \text{diag}(\mathbf{g}_{k,i}^I) \mathbf{f}_k^H$, $H_{k,i}^I = |\mathbf{s}^T \mathbf{a}_{k,i} + h_{k,i}^I|$, $F_{k,i}^I = |\mathbf{s}^T \mathbf{b}_{k,i} + I_{k,i}^I|$, $\mathbf{g}_{k,i}^I$ 为 $\mathbf{g}_{k,n}^D$ 或 $\mathbf{g}_{k,r}^R$, $\mathbf{f}_{k,i}^I$ 为 $\mathbf{f}_{k,n}^D$ 或 $\mathbf{f}_{k,r}^R$, $h_{k,i}^I$ 为 $h_{k,n}^D$ 或 $h_{k,r}^R$, $I_{k,i}^I$ 为 $v_{k,n}$ 或 $s_{k,r}$, $\mathbf{c}_k = \text{diag}(\mathbf{g}_k^M) \mathbf{f}_k^H$, $\mathbf{d}_{i,k} = \text{diag}(\mathbf{g}_k^M) \mathbf{f}_{i,k}^I$, $H_k^M = |\mathbf{s}^T \mathbf{c}_k + h_k^H|$, $F_{k,i}^K = |\mathbf{s}^T \mathbf{d}_{i,k} + I_{i,k}^K|$, $I_{i,k}^K$ 为 $u_{n,k}$ 或 $z_{r,k}$ 。

(2) 搜索方向

将与 $\text{grad } R$ 共轭的切向量作为搜索方向:

$$\mathbf{d} = -\text{grad } R + \tau_1 T(\bar{\mathbf{d}}) \quad (25)$$

其中, τ_1 为共轭梯度更新参数, $\bar{\mathbf{d}}$ 为前一次的搜

索方向, $T(\cdot)$ 为定义的向量传输函数, 其表达式为:

$$T(d) = \bar{d} - \text{Re}\{d \circ s^*\} \circ s \quad (26)$$

(3) 回缩

将切向量投射回复圆流形:

$$s_m \leftarrow \frac{(s + \tau_2 d)_m}{|(s + \tau_2 d)_m|} \quad (27)$$

其中, τ_2 为 Armijo 步长。提出的基于和速率最大化的资源分配与相移优化算法如算法 2 所示。

算法 2 基于和速率最大化的资源分配与相移优化算法

初始化: I 、 K , 偏好关系 $\succ_I$ 、 $\succ_K$, 初始化 ρ 、 P 、 Φ

输出: 系统和速率

步骤 1 利用基于相对信道强度的延迟接受匹配算法得到 ρ 的解

步骤 2 给定初始 Φ , 通过 SCA 获得目标函数的下界, 通过求解近似目标得到 P 的解, 作为相移向量优化问题的发射功率初始值

步骤 3 给定初始 P , 通过 RCG 算法求解 Φ , 作为下一次迭代中发射功率优化问题的初始值

步骤 4 重复步骤 2~步骤 3, 直到满足 $R - \bar{R} \leq 0.001$, $\bar{R}$ 为上一次迭代中得到的系统和速率, R 为此次迭代中得到的系统和速率

2.4 所提算法的复杂度与收敛性分析

所提算法的计算复杂度主要来自交替求解子问题 (P1.2) 与 (P1.3) 时 P 、 s 以及辅助变量的更新。在每次迭代中 (P1.2) 为凸优化问题, 其计算复杂度为 $O((N+R+K)^3)^{[23]}$ 。在每次迭代中 (P1.3) 利用 RCG 算法, 其计算复杂度为 $O(M^{1.5})^{[24]}$ 。因此, 所提算法的复杂度为 $O(I_{\text{ite}}[(N+R+K)^3 + M^{1.5}])$, 其中, I_{ite} 为交替迭代次数。

在算法 2 的步骤 2 中, 发射功率问题的解 $P^{(j+1)}$ 是在给定 $\Phi^{(j)}$ 下得到的次优解, 可以得到关

于和速率的不等式:

$$\begin{aligned} R(P^{(j)}, \Phi^{(j)}) &\stackrel{(a)}{=} R_l(P^{(j)}, \Phi^{(j)}) \\ &\stackrel{(b)}{\leq} R_l(P^{(j+1)}, \Phi^{(j)}) \\ &\stackrel{(c)}{=} R(P^{(j+1)}, \Phi^{(j)}) \end{aligned} \quad (28)$$

由于泰勒展开式 (18) 在点 $P^{(j)}$ 处与 $P^{(j+1)}$ 是紧密的, 因此, 式 (28) 中的 (a) 与 (c) 成立, 由于 $P^{(j+1)}$ 是 (P1.2) 的最优解, 因此, 式 (28) 中的 (b) 成立。在表 2 的 STEP3 中, $\Phi^{(j+1)}$ 是 (P1.3) 的最优解, 可以得到以下不等式:

$$R(P^{(j+1)}, \Phi^{(j)}) \leq R_l(P^{(j+1)}, \Phi^{(j+1)}) \quad (29)$$

根据式 (28) 与式 (29) 可知:

$$R(P^{(j)}, \Phi^{(j)}) \leq R_l(P^{(j+1)}, \Phi^{(j+1)}) \quad (30)$$

因此, 在所提算法中的每一次迭代中, 目标值都是非递减的。此外, 由于目标函数在紧密的可行集上是连续的, 所提出交替优化方法的优化目标是具有上界的, 即算法具有收敛性。

3 仿真与性能分析

本文通过 MATLAB 对所提出的基于系统和速率最大化资源分配与波束成形优化方法进行仿真分析。在基于 H-CRAN 中 IRS 辅助的 D2D 通信

系统中, 大尺度衰落模型为 $C_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\alpha}$, 其中,

$C_0 = 0.001$, 参考距离 $d_0 = 1$ m, d 代表发送端与接收端之间的距离。 α 为路径损耗系数, IRS 相关信道的路径损耗系数为 2.2, 从 HPN 到 DR/RUE/MUE、从 RRH 到 DR/RUE/MUE 之间信道的路径损耗系数为 3.8, 从 DT 到 DR/RUE/MUE 之间信道的路径损耗系数为 4。IRS 无关信道的小尺度衰落为独立同分布的瑞利衰落信道, IRS 相关信道的小尺度衰落为莱斯衰落信道, 其模型为

$$\sqrt{\frac{\beta}{\beta+1}} h^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{\beta+1}} h^{\text{NLoS}}, \quad \text{其中, } h^{\text{LoS}} \text{ 与 } h^{\text{NLoS}}$$

分别为服从循环对称复高斯分布即 $\text{CN}(0, 1)$ 的视距分量与非视距分量, $\beta = 10$ 为莱斯因子^[25]。



假设 HPN、RRH、D2D 链路、RUE 与 MUE 部署在半径为 500 m 的宏小区中，HPN 位于 (0,0) 处，MUE 随机分布在以 HPN 为圆心、半径为 100 m 的圆形小区中，D2D 链路均匀且随机分布在宏小区中，并且 DT 与 DR 之间的最大距离为 50 m。为避免 HPN 到 D2D 链路的严重干扰，两者的距离必须超过 100 m。RUE 随机分布在以 RRH 为圆心、半径为 100 m 的圆形小区中，一个 RRH 小区存在一个 RUE。RRH 与 D2D 链路的数量为 $N=R=3$ ，MUE 的数量为 $K=6$ ，RRH 的位置分别为 $(0, 350)$ 、 $(-175\sqrt{3}, -175)$ 、 $(175\sqrt{3}, -175)$ ，接收端噪声功率为 $\sigma^2 = -114$ dBm， $R_{\min}^M = \text{lb}(1 + \gamma_{\min}^M) = 0.3 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。

不同信道分配策略下交替优化方案的收敛性能如图 2 所示，将本文所提基于相对信道强度的延迟接受匹配方案分别与文献[14]中的信道分配算法和随机信道分配方案进行比较。在优化策略上，三者都对发射功率与 IRS 相移矩阵进行交替优化，而对于子信道资源的分配采取了不同方案。图 2 中 $P_{\max}^H = 46$ dBm， $P_{\max}^R = 33$ dBm， $P_{\max}^D = 23$ dBm，IRS 反射阵源数 $M=50$ ，IRS 的位置为 (100,0)。由图 2 可知，与子信道随机分配方案相比，所提出的信道分配方案能够有效地为底层用户分配合适的子信道资源，以达到提高系统和速率的目标。与文献[14]中的信道分配算法相比，所提信道分配方案将反射链路也考虑在内，提高了信道分配的合理性，进一步提高了系统和速率。在得到信道复用系数后，交替优化方案展现出了快速的收敛性能，和速率随迭代次数的增加而单调增加，并迅速收敛到某个值。

不同方案下 IRS 反射阵源数与和速率的关系如图 3 所示。其中， $P_{\max}^H = 46$ dBm， $P_{\max}^R = 33$ dBm， $P_{\max}^D = 23$ dBm，IRS 的位置为 (100,0)。由图 3 的仿真结果可知，所提出的算法在 IRS 反射阵源数为 20~80 时优于其他方案。随着 IRS 反

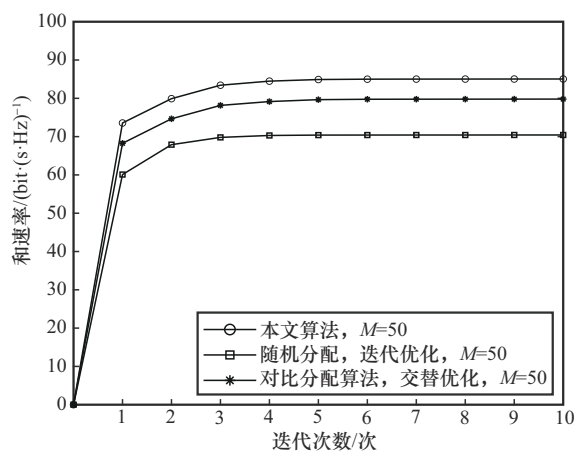


图2 不同信道分配策略下交替优化方案的收敛性能

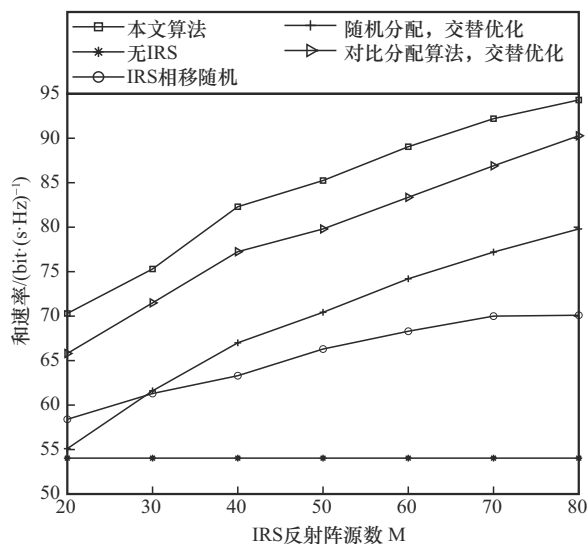


图3 不同方案下 IRS 反射阵源数与和速率的关系

射阵源数的增加，本文所提方案与基于信道随机分配的交替优化方案呈现增加的趋势，这表明 IRS 波束成形可以有效抑制同信道干扰。此外，对于 IRS 反射相移随机的情况，缺乏 IRS 波束成形导致反射链路干扰增加，因此，增加反射阵源数对和速率的提高相对有限。与无 IRS 的通信场景相比，IRS 能显著提高系统和速率，表明了 H-CRAN 中 D2D 通信系统下部署 IRS 的必要性。

IRS 位置对所提方案和速率性能的影响如图 4 所示。IRS 坐标位置分别设置为 $(-500, 0)$ 、 $(-400, 0)$ 、 $\dots$ 、 $(400, 0)$ 、 $(500, 0)$ 。图 4 的横轴表示 IRS 坐标位置的横坐标。由图 4 的仿真结果可知，当

IRS 的位置为 $(-500, 0)$ 与 $(0, 500)$ 时, 即位于该宏小区边缘时, 系统和速率最小, 当 IRS 位于宏小区中心时, 系统和速率最大。IRS 反射链路的路径损耗随着 IRS 向中心区域移动而改变, IRS 的反射信号增强, 这充分发挥了 IRS 增强通信信道并抑制干扰信道的作用。

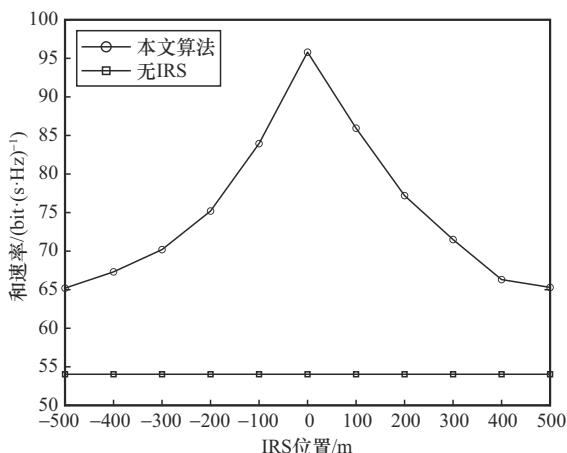


图4 IRS 位置对所提方案和速率性能的影响

不同方案下 HPN 最大发射功率与和速率的关系如图 5 所示。其中, $P_{\max}^R = 33$ dBm, $P_{\max}^D = 23$ dBm, IRS 的位置为 $(100, 0)$, $M = 50$ 。由图 5 的仿真结果可知, 系统和速率随着 HPN 最大发射功率 $P_{\max}^H$ 的增加而提高。此外, 当 $P_{\max}^H$ 增加到一定值时, 和速率的增速放缓。这是因为随着发射功率变大, HPN 以及 HPN 的反射链路对底层用户的干扰信道增益也会相应增加。与文献[14]中的信道分配算法和随机信道分配方案分别进行比较可得, 所提信道分配方案能够显著提高系统的和速率性能。与基于信道随机分配的交替优化方案相比, 本文所提方案在 IRS 相移随机的情况下, 系统和速率曲线的斜率较小。这是由于缺少波束成形, 无法抑制反射链路的干扰。

4 结束语

本文研究了 H-CRAN 中 IRS 辅助的 D2D 通信系统中基于和速率最大化的资源分配与 IRS 波束

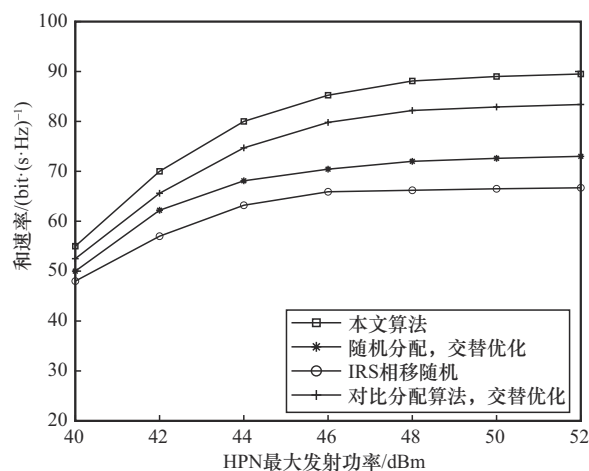


图5 不同方案下 HPN 最大发射功率与和速率的关系

成形向量的联合设计与优化。本文以最大化系统和速率为目标, 在子信道复用上限、最大发射功率以及 IRS 相移约束等多约束条件下构造和速率优化问题, 首先提出一种基于相对信道强度的延迟接受匹配算法, 以确定信道复用系数, 进而将目标问题解耦为发射功率优化子问题与 IRS 波束成形子问题, 并对这两个变量进行交替优化。对于发射功率优化子问题, 本文利用 SCA 逼近目标函数的下界并获得近似最优发射功率解。对于 IRS 无源波束成形子问题, 本文将 IRS 相移约束转化为复圆流形并采用 RCG 算法求解。仿真结果表明, 所提出的基于信道相对强度的交替优化算法具有良好的收敛性, 并且 IRS 能够有效抑制同信道干扰, 从而显著提高系统和速率。后续需要对底层用户复用一个或多个子信道的情况展开研究, 以进一步提高信道利用率。

参考文献:

- [1] LI J, PENG M G, YU Y L, et al. Energy-efficient joint congestion control and resource optimization in heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9873-9887.
- [2] PENG M G, LI Y, JIANG J M, et al. Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 126-135.
- [3] ZHANG Y, WANG Y, ZHANG W D. Energy efficient resource



- allocation for heterogeneous cloud radio access networks with user cooperation and QoS guarantees[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [4] ZHAO G G, CHEN S, QI L, et al. Mobile-traffic-aware offloading for energy- and spectral-efficient large-scale D2D-enabled cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(6): 3251-3264.
- [5] V R T, M K. A survey on device to device communications[C]//Proceedings of the 2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [6] JAMEEL F, HAMID Z, JABEEN F, et al. A survey of device-to-device communications: research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 2133-2168.
- [7] ZHANG J J, WANG X Q, ZHANG B H, et al. Resource allocation for D2D communication underlying 5G heterogeneous cloud radio access networks[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 854-859.
- [8] MUSTAFA H A, SHAKIR M Z, SAMBO Y A, et al. Spectral efficiency improvements in HetNets by exploiting device-to-device communications[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2014: 857-862.
- [9] CHEN Y L, AI B, ZHANG H L, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted device-to-device communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(5): 2792-2804.
- [10] 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.
- [11] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1838-1851.
- [12] KAI C H, XU L, ZHANG J J, et al. Joint uplink and downlink resource allocation for D2D communication underlying cellular networks[C]//Proceedings of the 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [13] CHANG W, JAU Y T, SU S L, et al. Gale-Shapley-algorithm based resource allocation scheme for device-to-device communications underlying downlink cellular networks[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [14] YANG G, LIAO Y T, LIANG Y C, et al. Reconfigurable intelligent surface empowered device-to-device communication underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(11): 7790-7805.
- [15] BHARDWAJ A, AGNIHOTRI S. Energy- and spectral-efficiency trade-off for D2D-multicasts in underlay cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(4): 546-549.
- [16] CAO Y S, LV T J, NI W, et al. Sum-rate maximization for multi-reconfigurable intelligent surface-assisted device-to-device communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(11): 7283-7296.
- [17] GUO H Y, LIANG Y C, CHEN J, et al. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3064-3076.
- [18] XU X R, REN H X, BAO J R, et al. An enhanced interference alignment strategy with MIL criterion and RCG algorithm for IRS-assisted multiuser MIMO[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(3): 1001-1005.
- [19] ZHANG B L, MAO X W, YU J L, et al. Resource allocation for 5G heterogeneous cloud radio access networks with D2D communication: a matching and coalition approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 5883-5894.
- [20] 刘期烈, 杨建红, 徐勇军, 等. 面向安全通信的智能反射面网络能效优化算法[J]. *电讯技术*, 2020, 60(12): 1391-1397.
- LIU Q L, YANG J H, XU Y J, et al. An energy-efficient optimization algorithm for secure-based intelligent reflecting surface networks[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(12): 1391-1397.
- [21] BECK A, BEN-TAL A, TETRUASHVILI L. A sequential parametric convex approximation method with applications to non-convex truss topology design problems[J]. *Journal of Global Optimization*, 2010, 47(1): 29-51.
- [22] BOUMAL N, MISHRA B, ABSIL P A, et al. Manopt, a Matlab toolbox for optimization on manifolds[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, 15: 1455-1459.
- [23] BHARADIA D, BANSAL G, KALIGINEDI P, et al. Relay and power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(9): 2812-2817.
- [24] YU X H, XU D F, SCHÖBER R. MISO wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces: (invited paper)[C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 735-740.
- [25] XU X R, ZHU W W, YANG S, et al. Second order rectified parallel factor model based cascaded channel estimation in IRS-assisted SWIPT system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(10): 13314-13325.

[作者简介]



许晓荣 (1982-), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能反射面辅助的端到端通信与智能反射面辅助的无线携能通信中的波束成形、资源分配与资源管理、物理层安全传输等。



吴俊 (1988-), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为智能反射面通信、无人机与物联网、认知无线电网络等。



薛纪守 (2000-), 男, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为异构云无线电接入网中智能反射面辅助的端到端通信、波束成形与传输方案设计、资源分配与优化等。



包建荣 (1978-), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为智能反射面通信、基于移动卫星星座系统的海洋通信、深空通信信道编码理论等。