



# 双智能反射平面辅助无线携能通信系统的安全通信优化

陈健锋<sup>1</sup>, 崔苗<sup>1,2</sup>, 张广驰<sup>1,3</sup>, 武庆庆<sup>4</sup>, 曾慧<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006;

2. 中国电子科技集团公司第七研究所, 广东 广州 510310;

3. 广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006;

4. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门 999078)

**摘要:** 研究采用两个智能反射平面保障无线携能通信系统信息传输的物理层安全。通过联合优化两个智能反射平面的反射波束成形和基站的发射波束成形以最大化系统的总信息传输速率, 同时满足基站的发射功率约束、能量收集用户的最小能量收集约束与最大窃听速率约束, 以及智能反射平面反射系数的模一约束。由于存在两个智能反射平面之间的反射链路, 所构建优化问题的优化变量高度耦合, 难以直接求解。提出一种基于交替优化、半正定松弛和连续凸逼近的算法求问题的次优解。仿真结果表明, 与现有的基准方案相比, 所提算法能在保证信息传输安全和满足能量传输要求的情况下大幅提高系统的总数据速率。

**关键词:** 双智能反射平面; 无线携能通信; 物理层安全

**中图分类号:** TN929

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2022015

## Secure communication optimization for double-IRS assisted SWIPT system

CHEN Jianfeng<sup>1</sup>, CUI Miao<sup>1,2</sup>, ZHANG Guangchi<sup>1,3</sup>, WU Qingqing<sup>4</sup>, ZENG Hui<sup>2</sup>

1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2. No.7 Research Institute of China Electronics Technology Group Cooperation, Guangzhou 510310, China

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou 510006, China

4. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China

**Abstract:** Two intelligent reflecting surfaces (IRS) was applied to ensure the physical layer security of the informa-

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2021-12-06

通信作者: 张广驰, cepool@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1805300); 广东省科技计划项目 (No.2021A0505030015, No.2020A050515010, No.2019B010119001); 澳门科学技术发展基金项目 (No.SK-L-IOTSC(UM)-2021-2023, No.0119/2020/A3, No.0108/2020/A); 广东省自然科学基金资助项目 (No.2021A1515011900); 东南大学移动通信国家重点实验室公开项目 (No.2021D15); 广东特支计划项目 (No.2019TQ05X409)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1805300), The Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (No.2021A0505030015, No.2020A050515010, No.2019B010119001), Science and Technology Development Fund of Macau SAR (No.SK-L-IOTSC(UM)-2021-2023, No.0119/2020/A3, No.0108/2020/A), The Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2021A1515011900), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (No.2021D15), Special Support Plan for High-Level Talents of Guangdong Province (No.2019TQ05X409)



tion transmission in a simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) system, where a multi-antenna base station (BS) simultaneously transmits information and energy to multiple single-antenna information receivers (IR) and energy receivers (ER) and the ERs are regarded as potential information eavesdroppers. The system deploys two IRSs to ensure the security of information transmission while meeting the requirements of energy transmission. Due to the inter-IRS signal reflection, the variables of the considered optimization problem are highly coupled, thus the problem is difficult to solve. To tackle this difficulty, an algorithm based on the alternating optimization, semidefinite relaxation, and successive convex approximation methods was proposed to obtain a suboptimal solution to the problem. Simulation results show that the proposed algorithm can significantly increase the total rate of the IRs and guarantee the security of the information transmission and the requirement of energy transmission, as compared to some existing benchmark schemes.

**Key words:** double-intelligent reflecting surface, simultaneous wireless information and power transfer, physical layer security

## 0 引言

随着物联网的日益普及和 5G 的全球性商用,学术界和工业界开始针对 6G 展开相关研究。除了速率比 5G 网络提高 10~100 倍外,6G 网络还具有智能和开放的特性<sup>[1-2]</sup>。智能反射平面(intelligent reflecting surface, IRS)技术作为 6G 关键技术,能提高无线通信频谱和能源效率,成为近年来工业界研究的热点<sup>[3-5]</sup>。IRS 利用大量低成本无源元件通过自适应动态调整反射信号的相移,重新配置无线传播信道,使通信性能得到进一步优化。与传统的有源波束成形技术相比,IRS 消除了信号的放大和再生,从而享受更低的硬件成本、能耗和干扰<sup>[5]</sup>。文献[6]研究了 IRS 辅助基于轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)的通信系统,通过联合优化基站发射功率和 IRS 的反射系数以最大化系统速率。文献[7]则研究了在干扰信道中利用多个 IRS 辅助系统通信,通过联合优化基站发射功率和 IRS 的反射系数以最大化可实现的速率区域。

另一方面,无线携能通信(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)技术从提出至今已经得到广泛的研究<sup>[8-11]</sup>,因其能在无线传感器网络、工业互联网等场景中为大量低功耗设备供电,被认为是未来物联泛在网络的

关键技术<sup>[12]</sup>。例如,在无线传感器网络场景中,一些传感器节点由于部署环境限制等原因,存在难以供电的问题,因此利用 SWIPT 技术在信息传输的同时对节点进行能量传输,能解决传感器节点的供电问题,扩大传感器网络的应用范围,提高使用灵活性。

将 IRS 与 SWIPT 相结合,能同时发挥两种技术的各自优势。一方面,IRS 能建立高质量虚拟视距的反射链路,通过优化 IRS 的被动波束成形,能有效提高用户信噪比,且信噪比随 IRS 反射单元的数目呈二次方增加,因而 IRS 能提高信息传输性能<sup>[3]</sup>。另一方面,IRS 的智能反射能有效补偿无线射频信号的路径损耗,从而在 IRS 附近建立有效的能量收集区域,提高能量传输效率。文献[13]考虑了一个 IRS 辅助下行 SWIPT 的多输入单输出(multiple-input single-output, MISO)系统,基站向不同用户分别发送信息和功率,通过交替优化基站的发射功率和 IRS 的反射相移以最大化能量收集用户收到的能量。文献[14]考虑了一个 IRS 辅助下行 SWIPT 的多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统,通过联合优化基站的波束成形和 IRS 的反射系数在信道不完备的条件下最大化信息收集用户的速率。文献[15]则研究了一个 IRS 辅助下行 SWIPT 的 MISO 系统,基站将数据和能量一起发送给一组用户,用户采用

功率分裂 (power splitting, PS) 的方式解码数据并获取能量, 通过联合优化基站的波束成形、功率分裂因子和 IRS 处的反射相移以最大化能源效率。但是, 已有的研究均未考虑双 IRS 辅助 SWIPT 系统进行通信。传统的单 IRS 辅助 SWIPT 系统由于路径损耗的存在, 存在服务范围较小、难以同时满足信息收集用户与能量收集用户的服务质量 (quality-of-service, QoS) 等问题。通过部署两个不同的 IRS 在能量收集用户群和信息收集用户群附近, 引入了两个 IRS 之间的反射链路, 能为无线携能通信提供新的路径, 增加新的优化自由度, 不仅能提高能量收集用户和信息收集用户的服务质量, 而且能有效增加系统的服务覆盖范围。

SWIPT 系统的信息传输容易受到窃听, 信息通信安全已经成为该系统亟待解决的关键问题之一。例如, 为了满足充能需求, 能量收集用户通常比信息收集用户更加靠近基站, 具有更高的信道增益, 由于信息信号和能量信号是同时传输的, 能量收集用户往往比信息收集用户接收到更强的信息信号, 因此窃听信息收集用户的隐私信息成为可能。近年来, 除了在教育层上采用传统的加密方法外, 为现代无线通信所设计的物理层安全 (physical layer security, PLS) 的方法已经被提出, 如协作中继<sup>[16]</sup>、人工噪声<sup>[17]</sup>和协同干扰<sup>[18]</sup>等。同时, 一些 PLS 相关问题的研究已经应用到 IRS 辅助的通信系统之中<sup>[19-23]</sup>。文献[19]首先研究 IRS 辅助的多天线系统的物理层安全问题, 通过优化基站的波束成形和 IRS 的反射系数, 相较于无 IRS 的情况能大大提高信息保密率。文献[20]提出了一种鲁棒传输波束成形的算法以及采用人工噪声的方法降低多天线窃听者的窃听速率以实现 IRS 辅助系统中的安全通信。文献[21]则首次应用双 IRS 辅助系统通信, 在考虑了 IRS 之间的反射链路的情况下, 通过联合优化基站的波束成形和 IRS 的反射相移来最大化系统安全速率。文献[22]考虑了一个 IRS 辅助 SWIPT 的 MISO 系统, 其中能量收

集用户为潜在窃听者, 通过联合优化基站处的波束成形向量和人工噪声矩阵以及 IRS 处的反射相移最大化系统的能量效率。文献[23]则考虑了一个 IRS 辅助 SWIPT 的 MIMO 系统, 其中能量收集用户是潜在窃听者, 通过联合优化基站的发射功率和 IRS 的反射相移最大化系统保密率。但是, 文献[13-15]均没有考虑传输过程中的安全性问题, 文献[19]、文献[21]和文献[23]只考虑了单个用户和单个窃听者的情况, 文献[20]虽然考虑了多用户和多窃听者的存在, 但是没有考虑无线能量传输的场景。因此, 上述工作虽然研究了 IRS 辅助 SWIPT 系统的安全通信, 但是双 IRS 辅助 SWIPT 系统且考虑 IRS 之间反射链路的安全通信还没有文献报道, 其中同时保证多个用户的信息传输安全和能量接收质量是研究的难点。

综上所述, 本文研究一个由双 IRS 辅助的下行 SWIPT 多用户安全通信系统, 其中部署了两个 IRS 去辅助系统的信息和能量传输。研究通过联合优化 IRS 的反射系数以及基站的发射波束成形, 在满足基站发射功率约束、能量收集用户的最低能量传输要求与最大窃听速率约束, 以及 IRS 反射系数的模一约束的条件下, 最大化信息传输总速率。与单 IRS 系统优化相比, 双 IRS 优化不仅要考虑两个 IRS 分别到用户之间的反射信道, 还需要考虑如何更好地利用两个 IRS 之间更好的信道来实现协作波束成形增益, 并且双 IRS 辅助的 SWIPT 系统的服务覆盖范围更广, 既能限制能量收集用户的窃听速率, 保障信息传输的物理层安全, 又确保能量传输达到要求。本文的创新点可以归纳为以下两点。

为保障 SWIPT 系统信息传输的绝对安全性, 考虑所有能量接收用户均为潜在的窃听者, 利用两个 IRS 创建的额外反射链路来辅助无线携能通信, 既能提高信息传输速率和能量传输功率, 又能确保信息安全。相关研究还没有文献报道。

本文所考虑的优化问题为非凸优化问题且优



化变量高度耦合, 使得难以求得问题的全局最优解。首先引入松弛变量, 将各优化变量进行解耦, 接着采用半正定规划 (semidefinite programming, SDP)、半正定松弛 (semidefinite relaxation, SDR) 和连续凸逼近 (successive convex approximation, SCA) 等方法将非凸优化问题转化为可解的凸优化问题, 再采用交替优化 (alternating optimization, AO) 和高斯随机法求得问题的高质量可行解。在求解过程中的优化变量解耦和子问题恒等变形上具有一定的创新性。

仿真结果表明, 与“无 IRS 辅助通信”“只有 IRS 1 辅助通信”“只有 IRS 2 辅助通信”“基站 MRT (maximum ratio transmission), 双 IRS 均优化”“基站 MRT, 只优化 IRS 1”和“基站 MRT, 只优化 IRS 2”这 6 种基准方案相比, 本文所提出的优化算法在信息传输总速率上有大幅度的提升, 且能量收集用户的最小能量传输要求得到了满足, 其窃听速率也被限定, 因此所提联合优化 IRS 的反射相移和基站的发射功率的算法具有优越的性能。

## 1 系统模型

双 IRS 辅助的下行 SWIPT 多用户通信系统如

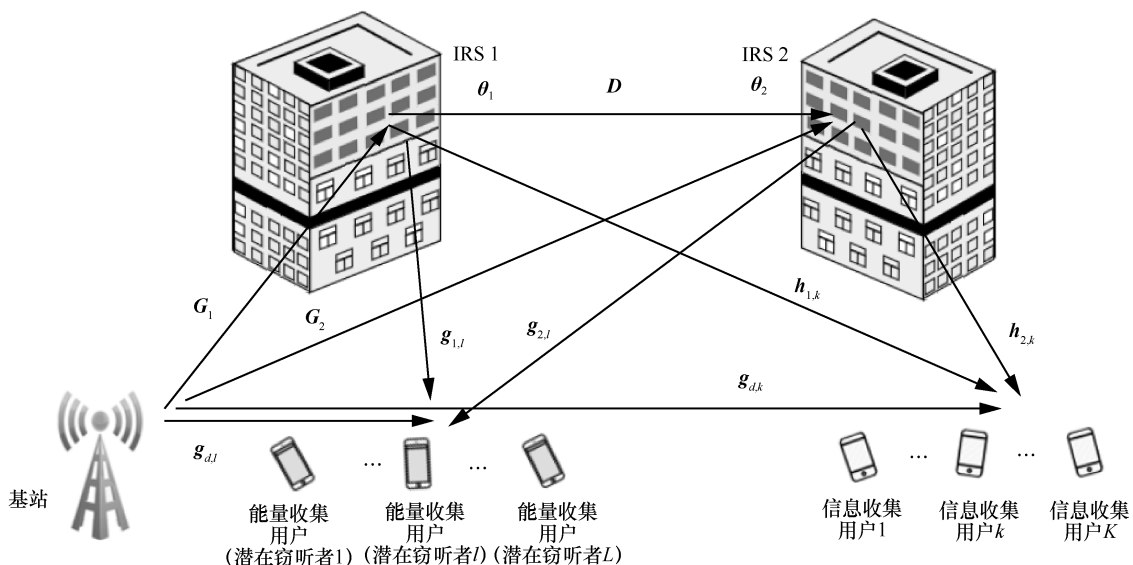


图 1 双 IRS 辅助的下行 SWIPT 多用户通信系统

图 1 所示, 本文考虑了一个由双 IRS 辅助的 SWIPT 通信系统, 它由一个基站、两个 IRS、 $K$  个合法的信息收集用户和  $L$  个能量收集用户 (潜在窃听者) 组成。其中, 基站有  $N_t$  ( $N_t > 1$ ) 根发射天线, 所有信息收集用户和能量收集用户均为单天线, IRS 1 有  $M_1$  个反射单元, IRS 2 有  $M_2$  个反射单元,  $k \in \{1, \dots, K\}$ ,  $l \in \{1, \dots, L\}$ 。

基站同时向  $K$  个信息收集用户发送信息和  $L$  个能量收集用户发送能量。为了满足充能需求, 能量收集用户通常比信息收集用户更加靠近基站且具有更强的信道, 这使得能量收集用户可能成为潜在的窃听者。为了满足能量传输要求并提高信息传输的安全性, 可以采用两个 IRS 协同配合的方式辅助系统通信。具体地, IRS 1 将基站发送的信息波束和能量波束发射反射给信息收集用户和能量收集用户, 同时将信号反射给 IRS 2; IRS 2 则将从基站和 IRS 1 收到的信号反射给信息收集用户和能量收集用户。与传统的单 IRS 辅助系统通信相比, 双 IRS 协同辅助系统通信不仅能为信息收集用户和能量收集用户创建新的通信链路, 提高信息传输速率和能量传输功率, 而且能量收集用户收到来自双 IRS 反射的能

量波束, 这些能量波束起到人工噪声的作用, 从而保证了信息传输的安全。

基站到 IRS 1 和 IRS 2 的信道分别表示为  $\mathbf{G}_1 \in C^{M_1 \times N_1}$  和  $\mathbf{G}_2 \in C^{M_2 \times N_1}$ , IRS 1 到 IRS 2 的信道表示为  $\mathbf{D} \in C^{M_2 \times M_1}$ ; 基站、IRS 1 和 IRS 2 到信息收集用户  $k$  的信道分别表示为  $\mathbf{h}_{d,k} \in C^{N_1 \times 1}$ 、 $\mathbf{h}_{1,k} \in C^{M_1 \times 1}$  和  $\mathbf{h}_{2,k} \in C^{M_2 \times 1}$ ; 基站、IRS 1 和 IRS 2 到能量收集用户  $l$  的信道分别表示为  $\mathbf{g}_{d,l} \in C^{N_1 \times 1}$ 、 $\mathbf{g}_{1,l} \in C^{M_1 \times 1}$  和  $\mathbf{g}_{2,l} \in C^{M_2 \times 1}$ 。  $C^{x \times y}$  表示  $x \times y$  维度的复值矩阵的集合。IRS 1 的反射相移矩阵表示为  $\boldsymbol{\theta}_1 = \text{diag}(\mathbf{v}_1^H)$ , 其中  $\mathbf{v}_1 = [q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1M_1}]^H$  ( $\mathbf{X}^H$  表示矩阵  $\mathbf{X}$  的共轭转置),  $q_{1n} = \beta_{1n} e^{j\phi_{1n}}$  表示第  $n$  个反射单元的反射系数,  $\beta_{1n} \in [0, 1]$  是其反射振幅,  $\phi_{1n} \in [0, 2\pi)$  是其反射相移<sup>[3]</sup>,  $n = \{1, \dots, M_1\}$ 。同理, IRS 2 的反射相移矩阵表示为  $\boldsymbol{\theta}_2 = \text{diag}(\mathbf{v}_2^H)$ , 其中  $\mathbf{v}_2 = [q_{21}, q_{22}, \dots, q_{2M_2}]^H$ ,  $q_{2n} = \beta_{2n} e^{j\phi_{2n}}$  表示第  $n$  个反射单元的反射系数,  $\beta_{2n} \in [0, 1]$  是其反射振幅,  $\phi_{2n} \in [0, 2\pi)$  是其反射相移,  $n = \{1, \dots, M_2\}$ 。为了描述所考虑双 IRS 辅助 SWIPT 系统的性能极限, 本文令  $\beta_{1n} = \beta_{2n} = 1$ , 且以上所有信道的信道状态信息 (channel state information, CSI) 均已知<sup>[19]</sup>。

基站发射的信号表示为  $\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k s_k^{\text{ID}} + \sum_{l=1}^L \mathbf{z}_l s_l^{\text{EH}}$ , 其中,  $s_k^{\text{ID}} \in C$  表示基站传输给第  $k$  个信息收集用户的信息,  $\mathbf{w}_k \in C^{N_1 \times 1}$  表示对应的波束成形;  $s_l^{\text{EH}} \in C$  表示基站传输给第  $l$  个能量收集用户的信息,  $\mathbf{z}_l \in C^{N_1 \times 1}$  表示对应的波束成形。  $s_k^{\text{ID}}$  和  $s_l^{\text{EH}}$  都是单位功率, 满足  $E[|s_k^{\text{ID}}|^2] = 1$  和  $E[|s_l^{\text{EH}}|^2] = 1$ <sup>[24]</sup>,  $E$  表示期望运算。于是, 第  $k$  个信息收集用户收到的信号可表示为:

$$\begin{aligned} y_k = & \mathbf{h}_{1,k}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + \mathbf{h}_{2,k}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 \mathbf{x} + \\ & \mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + \mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{x} + c_k \end{aligned} \quad (1)$$

第  $l$  个能量收集用户收到的信号可表示为:

$$y_l^{(E)} = \mathbf{g}_{1,l}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + \mathbf{g}_{2,l}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 \mathbf{x} + \mathbf{g}_{2,l}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 \mathbf{x} + \mathbf{g}_{d,l}^H \mathbf{x} + d_l \quad (2)$$

其中,  $c_k \sim \text{CN}(0, \sigma_{1,k}^2)$  和  $d_l \sim \text{CN}(0, \sigma_{e,l}^2)$  分别表示信息收  $a = |(\mathbf{h}_{1,k}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k|^2$  集用户  $k$  处和能量收集用户  $l$  处的加性高斯白噪声,  $\text{CN}(\mu, \Sigma)$  表示均值为  $\mu$ 、方差为  $\Sigma$  的复高斯分布。于是, 信息收集用户  $k$  的信息速率可表示为<sup>[25]</sup>:

$$R_k = \text{lb} \left( 1 + \frac{a}{b} \right) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} a = & |(\mathbf{h}_{1,k}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k|^2 \quad (4) \\ b = & \sum_{i \neq k}^K |(\mathbf{h}_{1,k}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_i|^2 + \\ & \sum_{n=1}^L |(\mathbf{h}_{1,k}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{z}_n|^2 + \sigma_{1,k}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

当能量收集用户  $l$  窃取信息收集用户  $k$  的信息时, 窃听速率可表示为:

$$C_{l,k}^{(E)} = \text{lb} \left( 1 + \frac{c}{d} \right) \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} c = & |(\mathbf{g}_{1,l}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{w}_k|^2 \quad (7) \\ d = & \sum_{i \neq k}^K |(\mathbf{g}_{1,l}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{w}_i|^2 + \sum_{n=1}^L |(\mathbf{g}_{1,l}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \\ & \mathbf{g}_{2,l}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{z}_n|^2 + \sigma_{e,l}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

能量收集用户  $l$  收到的能量表示为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} E_l = & \eta \left( \sum_{k=1}^K |(\mathbf{g}_{1,l}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{w}_k|^2 + \right. \\ & \left. \sum_{l=1}^L |(\mathbf{g}_{1,l}^H \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \boldsymbol{\theta}_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{z}_l|^2 \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\eta \in (0, 1]$  表示能量收集效率。

## 2 问题构建及优化算法

### 2.1 问题构建

本文通过联合优化系统中 IRS 1 的反射相移矩阵  $\boldsymbol{\theta}_1$ 、IRS 2 的反射相移矩阵  $\boldsymbol{\theta}_2$  和基站发射的波



束成形  $\{\mathbf{w}_k\}$ 、 $\{\mathbf{z}_l\}$ ，在保证能量收集用户的窃听速率不大于最大窃听速率、收到的能量不小于最低能量要求，IRS 的反射系数满足模一约束以及基站不超过最大发射功率约束的情况下最大化系统总速率，因此，所考虑的问题具体描述如下：

$$(P0): \max_{\{\mathbf{w}_k\}, \{\mathbf{z}_l\}, \theta_1, \theta_2} \sum_{k=1}^K R_k \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 + \sum_{l=1}^L \|\mathbf{z}_l\|^2 \leq P_{AP} \quad (11)$$

$$C_{l,k}^{(E)} \leq \Phi_{l,k}, \forall l, k \quad (12)$$

$$E_l \geq \zeta_l, \forall l \quad (13)$$

$$|q_{1n}| = 1, \forall n \in \{1, \dots, M_1\} \quad (14)$$

$$|q_{2n}| = 1, \forall n \in \{1, \dots, M_2\} \quad (15)$$

其中， $P_{AP}$  表示基站最大发射功率， $\Phi_{l,k}$  是能量收集用户的最大窃听速率， $\zeta_l$  是能量收集用户的最低能量要求。由于目标函数和约束(12)、约束(13)中优化变量高度耦合，并且约束(14)、约束(15)的模一约束是非凸的，这使得难以求得问题(P0)的全局最优解。

为了解决优化变量高度耦合的问题，本文采用交替优化的方法将其解耦。具体来说，本文将问题(P0)拆分为3个子问题，通过交替地优化3个子问题，直到问题收敛为止。基本思路如下：(1) 固定  $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{z}_l$  和  $\theta_2$ ，优化  $\theta_1$ ；(2) 固定  $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{z}_l$  和  $\theta_1$ ，优化  $\theta_2$ ；(3) 固定  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ，优化  $\mathbf{w}_k$  和  $\mathbf{z}_l$ 。下面给出解决子问题的步骤和算法。

## 2.2 固定 $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{z}_l$ 和 $\theta_2$ ，优化 $\theta_1$

对于固定  $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{z}_l$  和  $\theta_2$ ，优化  $\theta_1$  的问题，本文先将问题(P0)转化为如下问题：

$$(P1): \max_{\theta_1} \sum_{k=1}^K \text{lb} \left( 1 + \frac{a}{b} \right) \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{lb} \left( 1 + \frac{c}{d} \right) \leq \Phi_{l,k}, \forall l, k \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \eta \left( \sum_{k=1}^K |(\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{w}_k|^2 \right. \\ & \left. + \sum_{l=1}^L |(\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \right. \\ & \left. \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{z}_l|^2 \right) \geq \zeta_l, \forall l \end{aligned} \quad (18)$$

$$|q_{1n}| = 1, \forall n \in \{1, \dots, M_1\} \quad (19)$$

其中， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的表达式如式(4)、式(5)、式(7)、式(8)所示。令  $\mathbf{s}_1 = [\mathbf{v}_1^H \mathbf{1}]^H$ ，因为  $\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H = \mathbf{v}_1^H \mathbf{B}_l + \mathbf{b}_l^H$ ，其中， $\mathbf{B}_l = \text{diag}(\mathbf{g}_{1,l}^H) \mathbf{G}_1 + \text{diag}(\mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D}) \mathbf{G}_1$ ， $\mathbf{b}_l^H = \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{d,l}^H$ ，所以以下等式成立<sup>[3]</sup>：

$$\frac{1}{\sigma_{e,l}^2} |(\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{w}_k|^2 = \mathbf{s}_1^H \mathbf{U}_{l,k} \mathbf{s}_1 \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sigma_{e,l}^2} |(\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{z}_n|^2 = \mathbf{s}_1^H \mathbf{Y}_{l,n} \mathbf{s}_1 \quad (21)$$

其中：

$$\mathbf{U}_{l,k} = \frac{1}{\sigma_{e,l}^2} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_l \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{B}_l^H & \mathbf{B}_l \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{b}_l \\ \mathbf{b}_l^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{B}_l^H & \mathbf{b}_l^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{b}_l \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{Y}_{l,n} = \frac{1}{\sigma_{e,l}^2} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_l \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{B}_l^H & \mathbf{B}_l \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{b}_l \\ \mathbf{b}_l^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{B}_l^H & \mathbf{b}_l^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{b}_l \end{bmatrix} \quad (23)$$

同理可得：

$$\frac{1}{\sigma_{1,k}^2} |(\mathbf{h}_{1,k}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k|^2 = \mathbf{s}_1^H \mathbf{R}_{k,k} \mathbf{s}_1 \quad (24)$$

$$\frac{1}{\sigma_{1,k}^2} |(\mathbf{h}_{1,k}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{z}_n|^2 = \mathbf{s}_1^H \mathbf{T}_{k,n} \mathbf{s}_1 \quad (25)$$

其中：

$$\mathbf{R}_{k,k} = \frac{1}{\sigma_{1,k}^2} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_k^H & \mathbf{A}_k \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{a}_k \\ \mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{A}_k^H & \mathbf{a}_k^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{a}_k \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{T}_{k,n} = \frac{1}{\sigma_{1,k}^2} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{A}_k^H & \mathbf{A}_k \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{a}_k \\ \mathbf{a}_k^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{A}_k^H & \mathbf{a}_k^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \mathbf{a}_k \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{A}_k = \text{diag}(\mathbf{h}_{1,k}^H) \mathbf{G}_1 + \text{diag}(\mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{D}) \mathbf{G}_1 \quad (28)$$

$$\mathbf{a}_k^H = \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{d,k}^H \quad (29)$$

本文运用半正定松弛的方法，令  $\mathbf{S}_1 = \mathbf{s}_1 \mathbf{s}_1^H$ ，将问题(P1)转化成包含优化变量秩一约束的半正定规划问题如下<sup>[11]</sup>：

(P2):

$$\min_{\mathbf{S}_1 \geq 0} -\sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \frac{\text{tr}(\mathbf{R}_{k,k} \mathbf{S}_1)}{\sum_{i \neq k}^K \text{tr}(\mathbf{R}_{k,i} \mathbf{S}_1) + \sum_{n=1}^L \text{tr}(\mathbf{T}_{k,n} \mathbf{S}_1) + 1}) \quad (30)$$

$$\text{s.t. } \text{tr}((\frac{1}{2^{\Phi_{l,k}} - 1} \mathbf{U}_{l,k} - \sum_{i \neq k}^K \mathbf{U}_{l,i} - \sum_{n=1}^L \mathbf{Y}_{l,n}) \mathbf{S}_1) \leq 1, \quad \forall l, k \quad (31)$$

$$\text{tr}(\eta \sigma_{e,l}^2 (\sum_{i=1}^K \mathbf{U}_{l,i} + \sum_{n=1}^L \mathbf{Y}_{l,n}) \mathbf{S}_1) \geq \zeta_l, \quad \forall l \quad (32)$$

$$\text{tr}(\mathbf{E}_n \mathbf{S}_1) = 1, \quad \forall n \in \{1, \dots, M_1\} \quad (33)$$

$$\text{rank}(\mathbf{S}_1) = 1 \quad (34)$$

其中, 矩阵  $\mathbf{E}_n$  的第  $(i, j)$  个元素为:

$$[\mathbf{E}_n]_{i,j} = \begin{cases} 1, & i = j = n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (35)$$

其中,  $\mathbf{S}_1 \geq 0$  表示半正定矩阵, 约束 (31) ~ 约束 (34) 分别是能量收集用户的窃听速率、能量要求、IRS 反射系数的模一和  $\mathbf{S}_1$  的秩一约束。

为了运用连续凸逼近的方法, 本文先将式 (30) 化简成两个凸函数相减的形式如下:

$$-\sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \frac{\text{tr}(\mathbf{R}_{k,k} \mathbf{S}_1)}{\sum_{i \neq k}^K \text{tr}(\mathbf{R}_{k,i} \mathbf{S}_1) + \sum_{n=1}^L \text{tr}(\mathbf{T}_{k,n} \mathbf{S}_1) + 1}) = N_1 - D_1 \quad (36)$$

其中,

$$N_1 = -\sum_{k=1}^K \text{lb}(\text{tr}((\sum_{i=1}^K \mathbf{R}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \mathbf{T}_{k,n}) \mathbf{S}_1) + 1) \quad (37)$$

$$D_1 = -\sum_{k=1}^K \text{lb}(\text{tr}((\sum_{i \neq k}^K \mathbf{R}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \mathbf{T}_{k,n}) \mathbf{S}_1) + 1) \quad (38)$$

观察可得  $N_1$  和  $D_1$  都是关于  $\mathbf{S}_1$  的凸函数<sup>[26]</sup>。

由于将凸函数进行一阶泰勒展开能得到它的全局下估计量<sup>[27]</sup>, 本文通过将  $D_1$  进行一阶泰勒展开找到其全局下估计量如下:

$$D_1(\mathbf{S}_1) \geq D_1(\mathbf{S}_1^{(t)}) + \text{tr}(\nabla_{\mathbf{S}_1}^H D_1(\mathbf{S}_1^{(t)}) (\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_1^{(t)})) \quad (39)$$

其中:

$$\nabla_{\mathbf{S}_1} D_1(\mathbf{S}_1) = -\frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i \neq k}^K \mathbf{R}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \mathbf{T}_{k,n}}{\text{tr}((\sum_{i \neq k}^K \mathbf{R}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \mathbf{T}_{k,n}) \mathbf{S}_1) + 1} \quad (40)$$

式 (40) 中的  $\mathbf{S}_1^{(t)}$  表示一阶泰勒展开式的可行点, 上标  $(t)$  表示优化变量的迭代次数。采用目标函数的凸上界替代目标函数后, 导致问题 (P2) 还不是一个凸问题的只有约束 (34) 的秩一约束。下面采用半正定松弛的方法, 即省略约束 (34), 得到 (P2) 松弛后的问题如下:

$$(P3): \min_{\mathbf{S}_1 \geq 0} N_1 - \text{tr}(\nabla_{\mathbf{S}_1}^H D_1(\mathbf{S}_1^{(t)}) \mathbf{S}_1) \quad (41)$$

$$\text{s.t. } \text{tr}((\frac{1}{2^{\Phi_{l,k}} - 1} \mathbf{U}_{l,k} - \sum_{i \neq k}^K \mathbf{U}_{l,i} - \sum_{n=1}^L \mathbf{Y}_{l,n}) \mathbf{S}_1) \leq 1, \quad \forall l, k \quad (42)$$

$$\text{tr}(\eta \sigma_{e,l}^2 (\sum_{i=1}^K \mathbf{U}_{l,i} + \sum_{n=1}^L \mathbf{Y}_{l,n}) \mathbf{S}_1) \geq \zeta_l, \quad \forall l \quad (43)$$

$$\text{tr}(\mathbf{E}_n \mathbf{S}_1) = 1, \quad \forall n \in \{1, \dots, M_1\} \quad (44)$$

问题 (P3) 是关于  $\mathbf{S}_1$  的凸优化问题, 可以使用内点法求解。为了解决省略掉的秩一约束, 本文采用高斯随机法来获得问题的近似解, 详细步骤可参考文献[28]。

### 2.3 固定 $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{z}_l$ 和 $\theta_1$ , 优化 $\theta_2$

对于固定  $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{z}_l$  和  $\theta_1$ , 优化  $\theta_2$  的问题, 与第 2.2 节类似, 令  $\mathbf{s}_2 = [\mathbf{v}_2^H \ 1]^H$ ,  $\mathbf{S}_2 = \mathbf{s}_2 \mathbf{s}_2^H$ , 采用半正定松弛和连续凸逼近的方法, 将非凸优化问题转化为如下凸优化问题:

$$(P4): \min_{\mathbf{S}_2 \forall l, k, 0} N_2 - \text{tr}(\nabla_{\mathbf{S}_2}^H D_2(\mathbf{S}_2^{(t)}) \mathbf{S}_2) \quad (45)$$

$$\text{s.t. } \text{tr}((\frac{1}{2^{\Phi_{l,k}} - 1} \tilde{\mathbf{U}}_{l,k} - \sum_{i \neq k}^K \tilde{\mathbf{U}}_{l,i} - \sum_{n=1}^L \tilde{\mathbf{Y}}_{l,n}) \mathbf{S}_2) \leq 1, \quad \forall l, k \quad (46)$$

$$\text{tr}(\eta \sigma_{e,l}^2 (\sum_{i=1}^K \tilde{\mathbf{U}}_{l,i} + \sum_{n=1}^L \tilde{\mathbf{Y}}_{l,n}) \mathbf{S}_2) \geq \zeta_l, \quad \forall l \quad (47)$$

$$\text{tr}(\mathbf{E}_n \mathbf{S}_2) = 1, \quad \forall n \in \{1, \dots, M_2\} \quad (48)$$

其中:

$$N_2 = -\sum_{k=1}^K \text{lb}(\text{tr}((\sum_{i=1}^K \tilde{\mathbf{R}}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \tilde{\mathbf{T}}_{k,n}) \mathbf{S}_2) + 1) \quad (49)$$

$$D_2 = -\sum_{k=1}^K \text{lb}(\text{tr}((\sum_{i \neq k}^K \tilde{\mathbf{R}}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \tilde{\mathbf{T}}_{k,n}) \mathbf{S}_2) + 1) \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{S}_2} D_2(\mathbf{S}_2) = & -\frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i \neq k}^K \tilde{\mathbf{R}}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \tilde{\mathbf{T}}_{k,n}}{\text{tr}((\sum_{i \neq k}^K \tilde{\mathbf{R}}_{k,i} + \sum_{n=1}^L \tilde{\mathbf{T}}_{k,n}) \mathbf{S}_2) + 1} \end{aligned} \quad (51)$$



$$\tilde{U}_{l,k} = \frac{1}{\sigma_{e,l}^2} \begin{bmatrix} \tilde{B}_l \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{B}_l^H & \tilde{B}_l \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{b}_l \\ \tilde{b}_l^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{B}_l^H & \tilde{b}_l^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{b}_l \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\tilde{Y}_{l,n} = \frac{1}{\sigma_{e,l}^2} \begin{bmatrix} \tilde{B}_l \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{B}_l^H & \tilde{B}_l \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{b}_l \\ \tilde{b}_l^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{B}_l^H & \tilde{b}_l^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{b}_l \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\tilde{R}_{k,k} = \frac{1}{\sigma_{1,k}^2} \begin{bmatrix} \tilde{A}_k \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{A}_k^H & \tilde{A}_k \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{a}_k \\ \tilde{a}_k^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{A}_k^H & \tilde{a}_k^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \tilde{a}_k \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\tilde{T}_{k,n} = \frac{1}{\sigma_{1,k}^2} \begin{bmatrix} \tilde{A}_k \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{A}_k^H & \tilde{A}_k \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{a}_k \\ \tilde{a}_k^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{A}_k^H & \tilde{a}_k^H \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \tilde{a}_k \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$\tilde{B}_l = \text{diag}(\mathbf{g}_{2,l}^H) \mathbf{G}_2 + \text{diag}(\mathbf{g}_{2,l}^H) \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 \quad (56)$$

$$\tilde{b}_l^H = \mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H \quad (57)$$

$$\tilde{A}_k = \text{diag}(\mathbf{h}_{2,k}^H) \mathbf{G}_2 + \text{diag}(\mathbf{h}_{2,k}^H) \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 \quad (58)$$

$$\tilde{a}_k^H = \mathbf{h}_{1,k}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H \quad (59)$$

问题 (P4) 是关于  $\mathbf{S}_2$  的凸优化问题, 可以使用内点法求解。同理为了解决省略掉的秩一约束, 本文应用高斯随机法来获得问题的近似解。

## 2.4 固定 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ , 优化 $\mathbf{w}_k$ 和 $\mathbf{z}_l$

对于固定  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 优化  $\mathbf{w}_k$  和  $\mathbf{z}_l$  的问题, 本文先将问题 (P0) 转化为如下问题:

$$(P5): \max_{\{\mathbf{w}_k\}, \{\mathbf{z}_l\}} \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \frac{a}{b}) \quad (60)$$

$$\text{s.t. } \text{lb}(1 + \frac{c}{d}) \leq \Phi_{l,k}, \forall l, k \quad (61)$$

$$\eta(\sum_{k=1}^K |(\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{w}_k|^2 + \sum_{l=1}^L |(\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{z}_l|^2) \geq \zeta_l, \forall l \quad (62)$$

$$\sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 + \sum_{l=1}^L \|\mathbf{z}_l\|^2 \leq P_{AP} \quad (63)$$

其中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的表达式如式 (4)、式 (5)、式 (7)、式 (8) 所示。为了更好地处理  $|(\mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H) \mathbf{w}_k|^2$  和  $|(\mathbf{h}_{1,k}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k|^2$ , 引入两个辅助变量  $\mathbf{g}_l^H$  和  $\mathbf{h}_k^H$ , 使其满足:

$$\mathbf{g}_l^H = \mathbf{g}_{1,l}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{g}_{2,l}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{g}_{d,l}^H \quad (64)$$

$$\mathbf{h}_k^H = \mathbf{h}_{1,k}^H \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{G}_2 + \mathbf{h}_{2,k}^H \theta_2 \mathbf{D} \theta_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{h}_{d,k}^H \quad (65)$$

$$\text{令 } \mathbf{W}_k = \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H, \quad \mathbf{Z}_l = \mathbf{z}_l \mathbf{z}_l^H, \quad N_l = \frac{1}{\sigma_{e,l}^2} \mathbf{g}_l \mathbf{g}_l^H,$$

$\mathbf{H}_k = \frac{1}{\sigma_{1,k}^2} \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H$ , 同求解问题 (P1) 一样, 运用半正定松弛和连续凸逼近的方法, 将问题 (P5) 转化为如下凸优化问题:

(P6):

$$\min_{\mathbf{W}_k \geq 0, \mathbf{Z}_l \geq 0} N_3 - \sum_{k=1}^K \text{tr}(\nabla_{\mathbf{W}_k}^H D_3(\mathbf{W}^{(t)}, \mathbf{Z}^{(t)}) \mathbf{W}_k) - \quad (66)$$

$$\sum_{l=1}^L \text{tr}(\nabla_{\mathbf{Z}_l}^H D_3(\mathbf{W}^{(t)}, \mathbf{Z}^{(t)}) \mathbf{Z}_l)$$

$$\text{s.t. } \text{tr}(N_l (\frac{1}{2^{\Phi_{l,k}} - 1} \mathbf{W}_k - \sum_{i \neq k} \mathbf{W}_i - \sum_{n=1}^L \mathbf{Z}_n)) \leq 1, \forall l, k \quad (67)$$

$$\eta \sigma_{e,l}^2 (\text{tr}(N_l (\sum_{i=1}^K \mathbf{W}_i + \sum_{n=1}^L \mathbf{Z}_n))) \geq \zeta_l, \forall l \quad (68)$$

$$\sum_{k=1}^K \text{tr}(\mathbf{W}_k) + \sum_{l=1}^L \text{tr}(\mathbf{Z}_l) \leq P_{AP} \quad (69)$$

其中:

$$N_3 = -\sum_{k=1}^K \log_2(\sum_{i=1}^K \text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{W}_i) + \sum_{n=1}^L \text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{Z}_n) + 1) \quad (70)$$

$$D_3 = -\sum_{k=1}^K \log_2(\sum_{i \neq k} \text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{W}_i) + \sum_{n=1}^L \text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{Z}_n) + 1) \quad (71)$$

$$\nabla_{\mathbf{W}_k} D_3(\mathbf{W}, \mathbf{Z}) = -\frac{1}{\ln 2} \sum_{j \neq k}^K \frac{\mathbf{H}_j}{\sum_{i \neq j}^K \text{tr}(\mathbf{H}_j \mathbf{W}_i) + \sum_{n=1}^L \text{tr}(\mathbf{H}_j \mathbf{Z}_n) + 1} \quad (72)$$

$$\nabla_{\mathbf{Z}_l} D_3(\mathbf{W}, \mathbf{Z}) = -\frac{1}{\ln 2} \sum_{j=1}^K \frac{\mathbf{H}_j}{\sum_{i \neq j}^K \text{tr}(\mathbf{H}_j \mathbf{W}_i) + \sum_{n=1}^L \text{tr}(\mathbf{H}_j \mathbf{Z}_n) + 1} \quad (73)$$

问题 (P6) 是关于  $\mathbf{W}_k$  和  $\mathbf{Z}_l$  的凸优化问题, 可以使用内点法求解。同理为了解决省略掉的秩一约束, 本文应用高斯随机法来获得问题的近似解。

## 2.5 算法总结

综上所述, 本文所提算法的求解过程如下面的伪代码所示:

初始化:  $\theta_1^{(0)}$ ,  $\theta_2^{(0)}$ ,  $\mathbf{w}_k^{(0)}$ ,  $\mathbf{z}_l^{(0)}$ , 目标函数  $R^{(0)} = f(\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \mathbf{w}_k^{(0)}, \mathbf{z}_l^{(0)})$ , 迭代次数  $r=0$ , 差阈



值为  $\varepsilon_0$ 。

重复:

给定  $\mathbf{w}_k^{(r)}$ 、 $\mathbf{z}_l^{(r)}$  和  $\boldsymbol{\theta}_2^{(r)}$ ，通过求解问题 (P3) 并应用高斯随机法获得近似解  $\boldsymbol{\theta}_1^{(r+1)}$ 。

给定  $\mathbf{w}_k^{(r)}$ 、 $\mathbf{z}_l^{(r)}$  和  $\boldsymbol{\theta}_1^{(r+1)}$ ，通过求解问题 (P4) 并应用高斯随机法获得近似解  $\boldsymbol{\theta}_2^{(r+1)}$ 。

给定  $\boldsymbol{\theta}_1^{(r+1)}$  和  $\boldsymbol{\theta}_2^{(r+1)}$ ，通过求解问题 (P6) 并应用高斯随机法获得近似解  $\mathbf{w}_k^{(r+1)}$  和  $\mathbf{z}_l^{(r+1)}$ 。

求得  $R^{(r+1)} = f(\boldsymbol{\theta}_1^{(r+1)}, \boldsymbol{\theta}_2^{(r+1)}, \mathbf{w}_k^{(r+1)}, \mathbf{z}_l^{(r+1)})$ 。

令  $r=r+1$ 。

直到:  $\frac{R^{(r)} - R^{(r-1)}}{R^{(r)}} \leq \varepsilon_0$

该算法的复杂度为  $O(\log \frac{1}{\varepsilon_0} ((\sqrt{M_1+1} + \sqrt{M_2+1} + \sqrt{N_t})K^3L^3 + (M_1^2\sqrt{M_1+1} + M_2^2\sqrt{M_2+1} + N_t^{\frac{5}{2}})K^2L^2))^{[29]}$ 。其中,  $O(\bullet)$  是大  $O$  记号, 表示时间复杂度。

### 3 仿真结果

通过计算机仿真验证所提的算法性能。在仿真中, 各节点的位置分布如图 2 所示, 基站的坐标为(0,0) m, IRS 1 的坐标为(2,2) m, IRS 2 的坐标为( $x_{\text{IRS2}}$ , 0) m。定义能量收集用户群的中心位置和信息收集用户群的中心位置到基站的距离分别为  $d_{\text{EHR}}$  和  $d_{\text{IDR}}$ , 能量收集用户群和信息收集用户群的半径分别为  $r_{\text{EHR}}$  和  $r_{\text{IDR}}$ 。令  $d_{\text{EHR}}=5$  m,  $r_{\text{EHR}}=1$  m,  $r_{\text{IDR}}=2$  m, 于是能量收集用户群的坐标表示为( $x_{\text{EHR}}$ , 0) m, 信息收集用户群的坐标表示为( $x_{\text{IDR}}$ , 0) m, 其中  $x_{\text{EHR}} \in [4, 6]$  m。

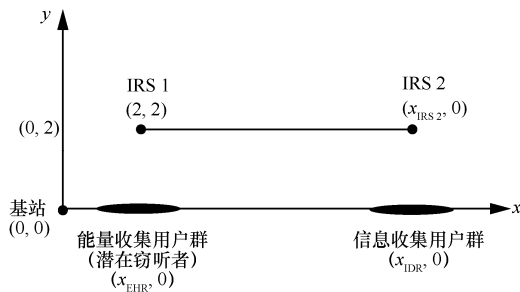


图 2 各节点的位置分布

在仿真中, 各条信道的模型表示如下:

$\mathbf{G}_1 = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{G_1})^{\alpha_{G_1}}} \tilde{\mathbf{G}}_1$ ,  $\mathbf{G}_2 = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{G_2})^{\alpha_{G_2}}} \tilde{\mathbf{G}}_2$ ,  
 $\mathbf{D} = \sqrt{\xi_0(d_0/d_D)^{\alpha_D}} \tilde{\mathbf{D}}$ ,  $\mathbf{g}_{1,l} = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{g_{1,l}})^{\alpha_{g_{1,l}}}} \tilde{\mathbf{g}}_{1,l}$ ,  
 $\mathbf{g}_{2,l} = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{g_{2,l}})^{\alpha_{g_{2,l}}}} \tilde{\mathbf{g}}_{2,l}$ ,  $\mathbf{g}_{d,l} = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{g_{d,l}})^{\alpha_{g_{d,l}}}} \tilde{\mathbf{g}}_{d,l}$ ,  
 $\mathbf{h}_{1,k} = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{h_{1,k}})^{\alpha_{h_{1,k}}}} \tilde{\mathbf{h}}_{1,k}$ ,  $\mathbf{h}_{2,k} = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{h_{2,k}})^{\alpha_{h_{2,k}}}} \tilde{\mathbf{h}}_{2,k}$ ,  
 $\mathbf{h}_{d,k} = \sqrt{\xi_0(d_0/d_{h_{d,k}})^{\alpha_{h_{d,k}}}} \tilde{\mathbf{h}}_{d,k}$ , 其中,  $\xi_0 = -30$  dB 表示在相对距离  $d_0=1$  m 的路径损耗,  $d_{G_1}$  和  $d_{G_2}$  分别表示基站到 IRS1 和 IRS2 的距离,  $d_D$  表示 IRS1 到 IRS2 的距离,  $d_{g_{1,l}}$ 、 $d_{g_{2,l}}$  和  $d_{g_{d,l}}$  分别表示 IRS1、IRS2 和基站到能量收集用户  $l$  的距离,  $d_{h_{1,k}}$ 、 $d_{h_{2,k}}$  和  $d_{h_{d,k}}$  分别表示 IRS1、IRS2 和基站到信息收集用户  $k$  的距离。路径损耗因子  $\alpha_{G_1} = \alpha_D = 2$ ,  
 $\alpha_{G_2} = \alpha_{g_{1,l}} = \alpha_{g_{2,l}} = \alpha_{h_{1,k}} = \alpha_{h_{2,k}} = 2.5$ ,  $\alpha_{g_{d,l}} = 3$ ,  
 $\alpha_{h_{d,k}} = 3.5$ 。 $\tilde{\mathbf{G}}_1$ 、 $\tilde{\mathbf{G}}_2$ 、 $\tilde{\mathbf{D}}$ 、 $\tilde{\mathbf{g}}_{1,l}$ 、 $\tilde{\mathbf{g}}_{2,l}$ 、 $\tilde{\mathbf{g}}_{d,l}$ 、 $\tilde{\mathbf{h}}_{1,k}$ 、 $\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}$  和  $\tilde{\mathbf{h}}_{d,k}$  表示各自信道的小尺度衰落, 其中设  $\tilde{\mathbf{g}}_{d,l}$  和  $\tilde{\mathbf{h}}_{d,k}$  为瑞利衰落信道, 其余信道均为莱斯衰落信道<sup>[21]</sup>。瑞利信道通过生成均值为 0、方差为 1 的复高斯分布序列得到。莱斯信道  $\tilde{\mathbf{G}}_1$  则由式 (74) 得到:

$$\tilde{\mathbf{G}}_1 = \sqrt{\frac{\beta_{G_1}}{1+\beta_{G_1}}} \mathbf{G}_1^L + \sqrt{\frac{1}{1+\beta_{G_1}}} \mathbf{G}_1^N \quad (74)$$

其中,  $\beta_{G_1}$  是莱斯因子, 设置为 1。 $\mathbf{G}_1^L$  为直射分量,  $\mathbf{G}_1^N$  为非直射分量通过生成均值为 0、方差为 1 的复高斯分布序列得到。莱斯信道  $\tilde{\mathbf{G}}_2$ 、 $\tilde{\mathbf{D}}$ 、 $\tilde{\mathbf{g}}_{1,l}$ 、 $\tilde{\mathbf{g}}_{2,l}$ 、 $\tilde{\mathbf{h}}_{1,k}$  和  $\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}$  均通过类似方法得到, 且莱斯因子均设置为 1, 具体细节可参考文献[20]。其他仿真参数如下: 基站的发射天线数目  $N_t=8$ , IRS 1 和 IRS 2 的反射单元数目  $M_1=M_2=N$ , 信息收集用户数目  $K=2$ , 能量收集用户数目  $L=2$ , 噪声功率  $\sigma_{1,k}^2 = \sigma_{e,l}^2 = -80$  dBm,  $\forall l, k$ , 能量收集用户的最大窃听速率和最低能量要求分别为  $\Phi_{l,k}=4$  bit/(s·Hz),  $\forall l, k$  和  $\zeta_l=1$   $\mu$ W,  $\forall l$ , 差阈值  $\varepsilon_0 = 5 \times 10^{-3}$ , 能量收集效率  $\eta=1$ 。

将所提算法与下列 7 种基准方案进行对比。

无 IRS 辅助通信, 即  $\boldsymbol{\theta}_1 = \boldsymbol{\theta}_2 = 0$ , 通过所提算



法的步骤4优化基站的发射功率。

只有 IRS1 辅助通信, 即  $\theta_2=0$ , 通过所提算法的步骤2和步骤4交替优化 IRS 1 的反射相移  $\theta_1$  和基站的发射功率。

只有 IRS 2 辅助通信, 即  $\theta_1=0$ , 通过所提算法的步骤3和步骤4交替优化 IRS 2 的反射相移  $\theta_2$  和基站的发射功率。

基站采用最大比率传输 (maximum ratio transmission, MRT) 方案, 通过所提算法的步骤2和步骤3交替优化得到 IRS 1 和 IRS 2 的反射相移  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。

基站 MRT, 只通过所提算法的步骤2优化 IRS 1 的反射相移  $\theta_1$ 。

基站 MRT, 只通过所提算法的步骤3优化 IRS 2 的反射相移  $\theta_2$ 。

上界: 在交替优化求解问题 (P0) 的过程中, 求解松弛问题 (P6)。

以下的所有仿真结果均是随机 500 次信道衰落后取其平均值得到的。

不同方案下系统总速率随基站发射功率增加的变化情况如图3所示, 本文提出的交替优化算法的性能非常接近其上界。所有传输方案的系

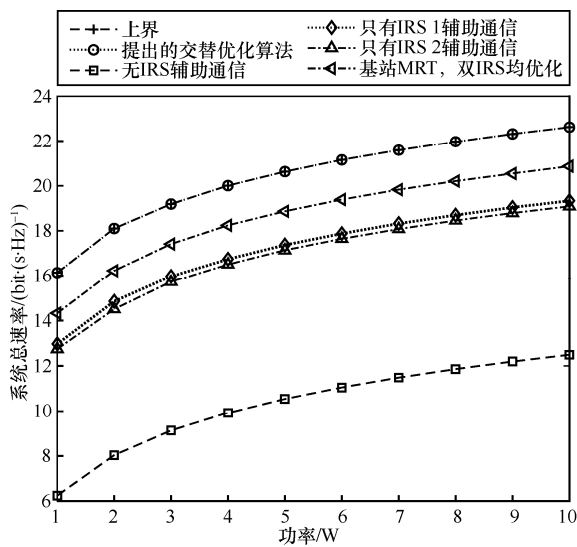


图3 不同方案下, 系统总速率随基站发射功率  $P_{AP}$  变化的情况 ( $N=64$ ,  $d_{IDR}=152$  m,  $x_{IDR} \in [150, 154]$  m,  $x_{IRS2}=150$  m)

统总速率均随基站发射功率的增加而增加。这是因为发射功率越大, 信息收集用户处的信噪比就越大, 信息速率就越高。可以观察到本文提出的算法方案比基站 MRT 方案得到的系统总速率要高, 说明优化基站的发射功率的有效性。此外, 无论在只有 IRS 1 辅助通信或只有 IRS 2 辅助通信的情况下, 系统总速率都比无 IRS 辅助通信时高了不少, 这是由于 IRS 能为信息收集用户创建新的反射链路, 增强了信号强度, 可见采用 IRS 来辅助通信能大大提高系统的总速率。还观察到当基站发射功率  $P_{AP}=3$  W 时, 本文的算法方案比“无 IRS 辅助通信”“只有 IRS 1 辅助通信”“只有 IRS 2 辅助通信”和“基站 MRT, 双 IRS 均优化”这 4 种方案在系统总速率上分别提高了 110.2%、20.2%、22.1%和 10.2%。这是由于双 IRS 协同辅助通信能创建更多反射链路, 加上通过优化基站的发射功率, 信息收集用户处的信号质量相比于其他方案有较大改善, 从而使得系统总速率在所有方案中是最高的。最后, 上述结果表明本文所提出的交替优化算法不仅能大幅提高系统总速率, 而且能保证能量收集用户  $1 \mu\text{W}$  的最低能量传输要求, 并使其窃听速率限制在  $4 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$  以内。仿真结果显示信息收集用户的总速率远远大于能量收集用户的最大窃听速率, 因此所提优化算法能有效保障系统的物理层安全。

$P_{AP}=35 \text{ dBm}$  时系统总速率随 IRS 反射单元数目增加的变化情况如图4所示。结果显示, 本文提出的交替优化算法的性能非常接近其上界。除了“无 IRS 辅助通信”的系统总速率随反射单元数目增加保持不变外, 其余 4 种方案的系统总速率均随反射单元的数目的增加而增加, 这说明了 IRS 的反射单元对提高系统性能是有效的, 且随着 IRS 反射单元数目的增加, 会收到更好的系统总速率增益。而且, 可以观察到当基站采用 MRT 方案时, 双 IRS 均优化时比只优化其中一个 IRS 的性能要好, 且反射单元数目越多, 性能提升越多, 这是因为随

着反射单元数目的增加,优化 IRS 的相移时资源分配方式变得更加灵活,IRS 在提高系统性能的作用上越明显,从而获得更好的增益。最后,从图 4 中结果可以观察所提算法取得的信息传输总速率远远大于能量收集用户的窃听速率,说明算法能有效保障系统的物理层安全。

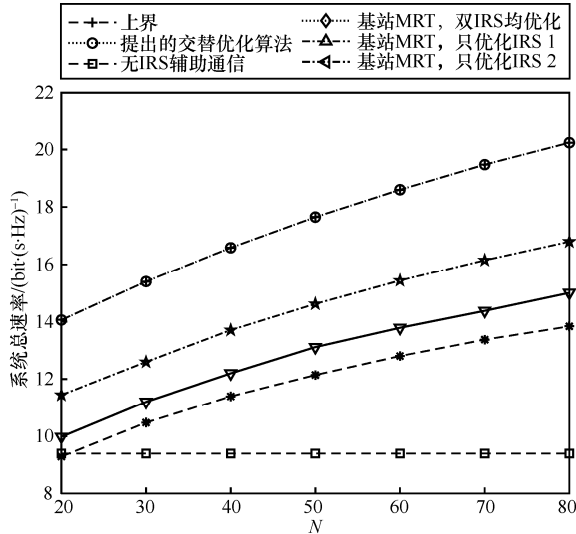


图4 不同方案下,系统总速率随 IRS 反射单元数目  $N$  变化的情况 ( $P_{AP}=35$  dBm,  $d_{IDR}=152$  m,  $x_{IDR} \in [150, 154]$  m,  $x_{IRS2}=150$  m)

系统总速率随信息收集用户群的中心位置到基站距离增大的变化情况如图 5 所示。结果显示,本文提出的交替优化算法的性能非常接近其上界。“无 IRS 辅助通信”和“只有 IRS 1 辅助通信”的系统总速率随信息收集用户群的中心位置到基站的距离增大而减小,这是路径损耗导致的,且后者总速率比前者高,说明 IRS 能大大提高系统性能。本文算法的方案与其余两种基准方案在系统总速率上均随距离的增大呈先减小后增大,在 150 m 处达到峰值后再减小的趋势,这是因为随着  $d_{IDR}$  的增大,基站直射给信息收集用户群的信号的距离也在增大,路径损耗同步增大,导致总速率下降;但是当  $d_{IDR}$  在 150 m 附近时,由于从 IRS 2 反射的信号到信息收集用户群的距离减小,路径损耗也在减小,反射信号的质量不断提高,从而导致总速率不断提高且在 150 m 处达到

峰值;当  $d_{IDR}$  继续增大时,直射信号和反射信号的质量均下降,总速率也同步下降。上述结果表明当信息收集用户群越靠近 IRS 2 时,经过 IRS 2 的反射信号越强,IRS 2 在提高系统总速率的作用上越明显。最后,与前述结果类似,所提算法的系统总速率远远大于能量收集用户的窃听速率,显示了算法能有效保障信息传输的物理层安全。

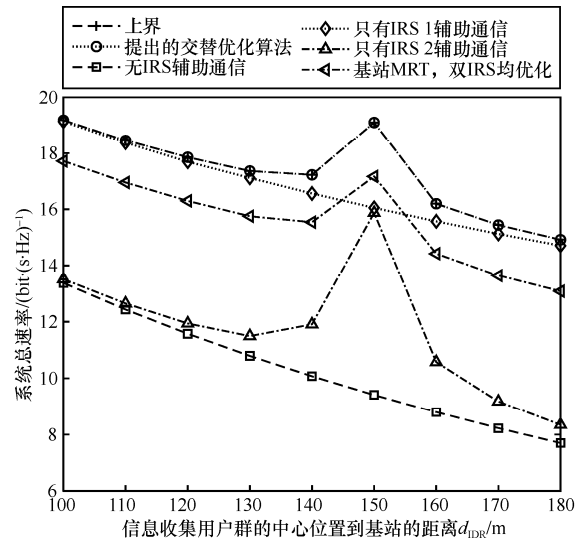


图5 不同方案下,系统总速率随信息收集用户群的中心位置到基站的距离  $d_{IDR}$  变化的情况 ( $P_{AP}=35$  dBm,  $N=64$ ,  $x_{IDR} \in [d_{IDR} - r_{IDR}, d_{IDR} + r_{IDR}]$  m,  $x_{IRS2}=150$  m)

系统总速率随着 IRS 2 到基站的水平距离增大的变化情况如图 6 所示。结果显示以上 4 种方案的系统总速率均随 IRS 2 的横坐标的增大呈先上升在 150 m 处达到峰值后再下降的趋势。这是因为随着  $x_{IRS2}$  的增大,从 IRS 2 反射的信号到信息收集用户群的距离逐渐减小,路径损耗也相应减小,于是信号质量更佳,从而使总速率不断增大且在 150 m 处达到峰值;当  $x_{IRS2}$  继续增大时,从 IRS 2 反射的信号到信息收集用户群的距离逐渐增大,路径损耗也相应增大,于是信号质量降低,导致总速率不断减小。最后通过对比“基站 MRT,双 IRS 均优化”和“基站 MRT,只优化 IRS 1”这两种方案,能清晰看到前者的性能比后者的性能更好,表明优化 IRS 2 的相移是有效的。

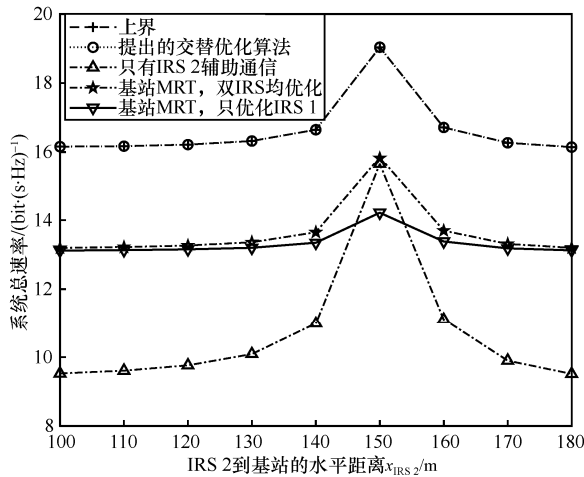


图6 不同方案下,系统总速率随IRS 2到基站水平距离 $x_{\text{IRS}2}$ 变化的情况( $P_{\text{AP}}=35$  dBm,  $N=64$ ,  $d_{\text{IDR}}=152$  m,  $x_{\text{IDR}} \in [150, 154]$  m)

所提算法的系统总速率随基站发射天线数目增加的变化情况如图7所示。图7中显示系统总速率随着发射天线数目的增加而不断增大,且当基站发射功率分别为4 W、8 W和12 W时,基站配备10根发射天线比配备5根发射天线时系统总速率提升分别为10.7%、9.3%和9.0%,这是因为发射天线数目越多,信道增益越大,由此导致的系统总速率增益就越大。另外基站的发射功率越大,信息收集用户出的信噪比就越大,信号质量越高,因此系统总速率就越大。还观察到提出

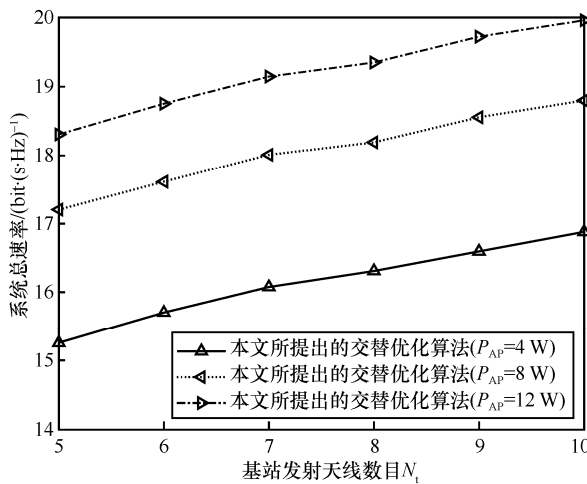


图7 不同发射功率 $P_{\text{AP}}$ 下,所提算法的系统总速率与基站发射天线数 $N_t$ 的关系

( $N=32$ ,  $d_{\text{IDR}}=152$  m,  $x_{\text{IDR}} \in [150, 154]$  m,  $x_{\text{IRS}2}=150$  m)

的交替优化算法在基站不同发射功率下的系统总速率远远大于最坏情况下能量收集用户总的窃听速率8 bit/(s·Hz),说明所提算法能有效保障系统的物理层安全。上述结果表明适当增加基站的发射天线数目能获得更高的系统总速率收益,由于能量收集用户的窃听速率受限,因而也能获得更高的物理层安全性能。

## 4 结束语

本文考虑IRS之间存在反射链路的双IRS辅助下行SWIPT多用户安全通信系统,通过联合优化IRS 1、IRS 2的反射相移和基站的波束成形,在保证能量传输满足要求并限制潜在窃听者的窃听速率的情况下,最大化系统的信息传输总速率。由于构建的优化问题是非凸优化问题且优化变量高度耦合,本文首先采用引入松弛变量、SDR和SCA等方法将非凸优化问题转化为可解的凸优化问题,然后采用交替优化和高斯随机法求得原问题的近似解。仿真结果表明,与6种基准方案相比较,本文所提出的方案不仅能保证能量收集用户的最低能量传输要求,而且能提高信息传输的安全性。与单IRS系统相比,双IRS辅助的SWIPT系统能充分利用两个IRS间的反射信道,从而获得更高的信息传输速率增益。联合优化IRS的反射系数和基站的波束成形比只优化其中一项在速率性能上有大幅提升,充分显示联合优化的有效性。

## 参考文献:

- [1] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.
- [2] ZHOU Y Q, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(5): 20-27.

- [3] 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.
- [4] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106-112.
- [5] ZHANG D C, WU Q Q, CUI M, et al. Throughput maximization for IRS-assisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(9): 1944-1948.
- [6] LI Y Q, JIANG M, ZHANG G C, et al. Achievable rate maximization for intelligent reflecting surface-assisted orbital angular momentum-based communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(7): 7277-7282.
- [7] JIANG M, LI Y Q, ZHANG G C, et al. Achievable rate region maximization in intelligent reflecting surfaces-assisted interference channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(12): 13406-13412.
- [8] GROVER P, SAHAI A. Shannon meets Tesla: wireless information and power transfer[C]//*Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 2363-2367.
- [9] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [10] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(1): 288-300.
- [11] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Secrecy wireless information and power transfer with MISO beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(7): 1850-1863.
- [12] WONG V W S, SCHÖBER R, NG D W K, et al. *Key Technologies for 5G Wireless Systems*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [13] WU Q Q, ZHANG R. Weighted sum power maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 586-590.
- [14] YANG Z Y, ZHANG Y. Optimal SWIPT in RIS-aided MIMO networks[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 112552-112560.
- [15] ZARGARI S, KHALILI A, ZHANG R. Energy efficiency maximization via joint active and passive beamforming design for multiuser MISO IRS-aided SWIPT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(3): 557-561.
- [16] LI J Y, PETROPULU A P, WEBER S. On cooperative relaying schemes for wireless physical layer security[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(10): 4985-4997.
- [17] SUN Y, NG D W K, ZHU J, et al. Robust and secure resource allocation for full-duplex MISO multicarrier NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 4119-4137.
- [18] DONG L, HAN Z, PETROPULU A P, et al. Improving wireless physical layer security via cooperating relays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(3): 1875-1888.
- [19] CUI M, ZHANG G C, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410-1414.
- [20] YU X H, XU D F, SUN Y, et al. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2637-2652.
- [21] DONG L M, WANG H M, BAI J L, et al. Double intelligent reflecting surface for secure transmission with inter-surface signal reflection[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2912-2916.
- [22] LIU J X, XIONG K, LU Y, et al. Energy efficiency in secure IRS-aided SWIPT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(11): 1884-1888.
- [23] NIU H H, LEI N. Intelligent reflect surface aided secure transmission in MIMO channel with SWIPT[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 192132-192140.
- [24] GOEL S, NEGI R. Guaranteeing secrecy using artificial noise[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(6): 2180-2189.
- [25] NEGI R, GOEL S. Secret communication using artificial noise[C]//*Proceedings of VTC-2005-Fall*. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, Piscataway: IEEE Press, 2005.
- [26] BOYD S, VANDENBERGHE L. *Convex optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [27] ZHAN C, ZENG Y. Completion time minimization for multi-UAV-enabled data collection[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(10): 4859-4872.
- [28] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: joint active and passive beamforming design[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [29] PÓLIK I, TERLAKY T. *Interior point methods for nonlinear optimization*[M]//*Nonlinear optimization*, Berlin, Germany: Springer, 2010.



[作者简介]



**陈健锋**（1998- ），男，广东工业大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为智能反射面和物理层安全。



**张广驰**（1982- ），男，广东工业大学信息工程学院教授，主要研究方向为新一代无线通信技术。



**崔苗**（1978- ），女，广东工业大学信息工程学院讲师，主要研究方向为新一代无线通信技术。

**武庆庆**（1991- ），男，博士，澳门大学助理教授、科睿唯安全球高被引科学家，主要研究方向为智能反射面等新一代无线通信技术。

**曾慧**（1983- ），男，现任职于中国电子科技集团公司第七研究所，主要研究方向为通信系统设计、物联网系统应用等。