

## 非完美信道状态信息下分布式智能反射面辅助安全通信研究

冯友宏<sup>\*①②③</sup> 张彦峨<sup>①</sup> 张玉峰<sup>①⑤</sup> 董国青<sup>①③</sup> 张然<sup>①④</sup> 王晔<sup>①</sup> 徐龙珠<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(安徽师范大学物理与电子信息学院芜湖 241000)

<sup>②</sup>(东南大学移动通信国家重点实验室南京 210096)

<sup>③</sup>(安徽智能机器人信息融合与控制工程实验室芜湖 241000)

<sup>④</sup>(东南大学毫米波全国重点实验室南京 210096)

<sup>⑤</sup>(池州学院机电工程学院 池州 247100)

**摘要:** 针对非完美信道状态信息(CSI)下分布式智能反射面(RIS)安全通信问题, 该文构建基于基站波束成形、人工噪声(AN)和RISs相移的联合优化问题, 并提出相对应优化方法和1维线性搜索的有效算法来求解所构建的非凸优化方程。仿真结果表明: 相对于随机相位、无AN辅助的安全传输策略, 所提方法在非完美CSI场景可取得更高的安全传输速率; 在总反射单元数目固定情况下, 随着分布单元数目越多所提算法优越性越明显; 进一步, 所提算法具有更强的鲁棒性, 即本策略更好适应信道不确定性。

**关键词:** 智能反射面; 物理层安全; 分布式; 鲁棒性; 非凸优化

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)YU-0001-09

DOI: 10.11999/JEIT230942

## Research on Distributed Reconfigurable Intelligent Surfaces-Assisted Security Communication under Imperfect Channel State Information

FENG Youhong<sup>①②③</sup> ZHANG Yane<sup>①</sup> ZHANG Yufeng<sup>①⑤</sup> DONG Guoqing<sup>①③</sup>  
ZHANG Ran<sup>①④</sup> WANG Ye<sup>①</sup> XU Longzhu<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

<sup>②</sup>(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>③</sup>(Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot, Wuhu 241000, China)

<sup>④</sup>(The State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>⑤</sup>(School of Mechanical and Electrical Engineering, Chizhou University, 247100, China)

**Abstract:** Considering the secure communication of the distributed Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) under imperfect Channel State Information (CSI), a joint optimization problem of the secrecy rate maximization based on the active beamforming, Artificial Noise(AN), and RISs' phase shifts is formulated. Then an efficient algorithm based on alternating optimization and 1-Dimensional linear search is proposed to solve the non-convex optimization problem. Simulation results demonstrate that, compared with the random phase optimization scheme and the secure transmission without AN scheme, the proposed scheme can achieve a higher secrecy rate. The superiority of the proposed scheme over the other transmission schemes becomes more prominent with the increase of the number of distribution units. The proposed scheme has better robustness than the other transmission schemes to the uncertainty of communication channel in our considered network.

收稿日期: 2023-08-30; 改回日期: 2024-01-25; 网络出版: 2024-02-07

\*通信作者: 冯友宏 yhfeng@ahnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62071005), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2023D14), 安徽省自然科学基金(2008085MF181), 安徽高校协同创新项目(GXXT-2023-109), 毫米波全国重点实验室开放研究基金(K202426), 安徽省高校优秀拔尖人才培养项目(gxyq2022117)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62071005), The open research fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2023D14), The Natural Science Foundation of Anhui Province (2008085MF181), The University Synergy Innovation Program of Anhui Province (GXXT-2023-109), The open research fund of State Key Laboratory of Millimeter Waves (K202426), Excellent Young Talents Support Program in Colleges and Universities (gxyq2022117)

**Key words:** Reconfigurable Intelligent Surface(RIS); Physical layer security; Distributed; Robustness; Non-convex optimization

## 1 引言

近年来,随着多媒体内容盛行以及智能终端设备数量快速增加,无线信息传输的数据通信量不断增长。与此同时,大量敏感信息以及机密信息,如财务数据、医疗信息和客户文件,将通过无线通道传输。由于无线通信信道的广播和随机特性,合法用户(User)的传输信号很容易被窃听用户干扰、截获和监听。因此,如何确保数据安全传输是无线通信面临的核心和关键问题之一<sup>[1,2]</sup>。

作为未来移动通信最有代表性的新型技术之一,可重构智能反射表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)以较低的成本为无线系统提供大量天线阵列进行波束成形,且在扩大信号覆盖范围,提高传输效率,提升传输性能,增强物理层安全(Physical Layer Security, PLS)等方面具有显著效果<sup>[3]</sup>。通过调整RIS入射信号的相位,可有效抑制窃听用户(Eve)端信噪比,降低在Eve接收到的信号质量,进而在一定程度上保证数据传输的安全性<sup>[4]</sup>。因此,利用RIS技术实现信息安全传输具有很强的理论和现实意义。

为了最大化系统安全率,文献<sup>[5-8]</sup>对RIS相移系数进行了优化。文献<sup>[9]</sup>研究了在一定的系统安全速率约束下,基于发射端功率分配与RIS反射相移的联合优化实现系统传输功率的最小化。文献<sup>[10]</sup>提出联合优化基站的主动波束成形与RIS辅助波束成形,并利用人工噪声(Artificial Noise, AN)的物理层安全最大化系统安全速率。然而,这些研究均基于集中式RIS部署模型。另一方面,为了降低能源消耗和方便部署等,尤其在密集阻塞或直通链路受严重路径损失的区域,采用分布式RIS辅助通信可为系统提供了一种更为有效的解决方案<sup>[3]</sup>。相比于传统集中式RIS辅助系统<sup>[11]</sup>,分布式RIS可提供更显著的协同反射波束成形增益以及更高的路径多样性。文献<sup>[12]</sup>在毫米波通信场景中部署了多个RIS用于补偿通信过程的高路径损耗,研究了多个RIS的选择问题。文献<sup>[13]</sup>提出利用多个RISs来提高单天线用户的物理层安全,并采用基于块坐标下降框架下的优化算法处理所构建的非凸优化问题。

上述所构建优化问题的模型均假设信道状态信息(Channel State Information, CSI)完美已知。考虑到窃听用户通常隐藏身份,对窃听用户假设完美CSI一般情况下是不切实际的。进一步,由于RIS本身信号处理能力有限以及无射频(Radio Frequency, RF)装置,导致难以获得完美的信道估计。因此,基于RIS辅助无线系统对通信信道进行估计

极具挑战性。文献<sup>[14-18]</sup>考虑了在窃听用户CSI非完美情况下的RIS辅助安全通信模型。文献<sup>[15]</sup>采用有界窃听用户CSI不确定性模型,为提高合法用户信息速率,优化了联合波束成形与人工噪声,尽可能减少信息的泄漏。文献<sup>[17]</sup>在统计级联CSI误差模型下,以最小化传输功率为目标,对基站的波束成形向量、AN协方差矩阵以及RIS相移进行联合优化。但到目前为止,基于分布式RIS辅助安全通信下同时考虑合法用户和窃听用户的CSI非完美情况的研究还较缺乏。

相较于现有研究,本文采用分布式RIS辅助安全通信,考虑非完美CSI对级联基站(Base Station, BS)-RISs-User以及BS-RISs-Eve信道的影响,以最大化安全速率为目标,提出一种基于AN和混合波束策略的鲁棒传输设计。主要创新工作如下:

(1)考虑更加实际的通信场景,即:RIS有限的信号处理能力、无RF装置以及窃听用户的隐蔽性,导致难以获得完美的CSI。分析研究级联系统中BS-RISs-User以及BS-RISs-Eve信道的非完美CSI通信,利用AN和混合波束成形技术实现系统的安全通信。构建基于基站波束成形、AN协方差矩阵和RISs相移的联合优化,实现安全传输速率最大化。

(2)考虑到所构建优化问题的非凸性、单位模量约束、以及非完美CSI引入的无穷多个不等式约束,研究所提优化问题的近似求解方案。提出有效求解方案求解所对应的优化方程:采用半定松弛(SemiDefinite Relaxation, SDR)算法求解基站波束成形向量和AN协方差矩阵;利用惩罚凹凸法(Penalty Convex-Concave Procedure, PCCP)获得RISs相移。

(3)仿真结果表明,相对于随机相位优化算法和无AN辅助的安全传输策略,本文所提算法在非完美CSI通信模型下可取得更高的安全传输速率,且在一定范围内,在总反射单元数固定情况下,随着分布单元数目越多本文所提算法优越性越明显。进一步,所提算法具有更强的鲁棒性,即本文所提算法能够更好适应信道不确定性。

## 2 系统模型及优化问题构建

### 2.1 系统模型

图1中,考虑多RIS辅助下行通信:在窃听用户(Eve)存在的情况下,多天线BS( $N_t$ 根天线)发送信息给合法用户(User)。由于障碍物阻碍,假设BS与用户不存在直接链路。为了提高系统可靠性和安

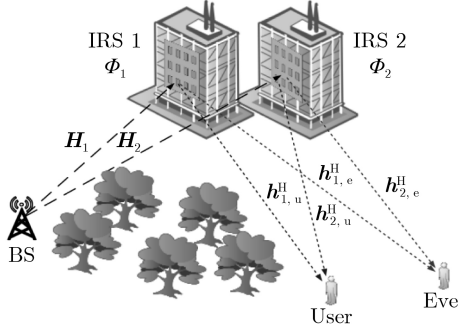


图1 非完美CSI下分布式RIS辅助无线通信系统模型

全性，在网络中部署 $L$ 个RISs(其中第 $l$ 个RIS配备 $M_l$ 个可编程移相器)。基站发送信号 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 为

$$\mathbf{x} = \mathbf{w}_u s_u + \mathbf{Z} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{w}_u \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $s_u \in \mathbb{C}$ 为合法用户波束形成向量以及合法用户的期望信号且满足 $s_u \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 。 $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$ 为干扰窃听用户的AN， $\mathbf{H}_l \in \mathbb{C}^{M_l \times N_t}$ ， $\mathbf{h}_{l,u}^H \in \mathbb{C}^{1 \times M_l}$ ， $\mathbf{h}_{l,e}^H \in \mathbb{C}^{1 \times M_l}$ 分别表示系统中基站到第 $l$ 个RIS链路，第 $l$ 个RIS到User链路、以及第 $l$ 个RIS与Eve之间的通信链路。第 $l$ 个RIS的相移矩阵表示为 $\boldsymbol{\Theta}_l = \text{diag}(e^{j\theta_l^1}, e^{j\theta_l^2}, \dots, e^{j\theta_l^{M_l}}) \in \mathbb{C}^{M_l \times M_l}$ ， $\forall l$ ， $\theta_l^m$ 表示第 $l$ 个RIS的第 $m$ 个相移。矩阵 $\boldsymbol{\Theta}_l$ 对角线元素的向量 $\boldsymbol{\phi}_l = (\phi_{l,1}, \phi_{l,2}, \dots, \phi_{l,M_l}) \in \mathbb{C}^{M_l \times 1}$ ， $\phi_{l,m} = e^{j\theta_l^m}$ ，RISs总反射单元 $M = \sum_{l=1}^L M_l$ 。 $n_u$ 和 $n_e$ 为合法和窃听者接收端的AWGN，且 $n_u \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_u^2)$ ， $n_e \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_e^2)$ 。

则合法用户、窃听用户的接收信号可分别为

$$\mathbf{y}_u = \sum_{l=1}^L \mathbf{h}_{l,u}^H \boldsymbol{\Theta}_l \mathbf{H}_l \mathbf{x} + n_u = \mathbf{h}_u^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H} \mathbf{x} + n_u = \hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{x} + n_u \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_e = \sum_{l=1}^L \mathbf{h}_{l,e}^H \boldsymbol{\Theta}_l \mathbf{H}_l \mathbf{x} + n_e = \mathbf{h}_e^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H} \mathbf{x} + n_e = \hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{x} + n_e \quad (3)$$

其中， $\mathbf{h}_u^H = (\mathbf{h}_{1,u}^H, \dots, \mathbf{h}_{L,u}^H) \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ ， $\mathbf{h}_e^H = (\mathbf{h}_{1,e}^H, \dots, \mathbf{h}_{L,e}^H) \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ ， $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_L] \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$ ， $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}(\boldsymbol{\Theta}_1, \boldsymbol{\Theta}_2, \dots, \boldsymbol{\Theta}_L) \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 。  $\hat{\mathbf{h}}_u^H = \boldsymbol{\Theta}^T \text{diag}(\mathbf{h}_u^H)$ ， $\mathbf{H} = \boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_w$ ， $\hat{\mathbf{h}}_e^H = \boldsymbol{\Theta}^T \text{diag}(\mathbf{h}_e^H) \mathbf{H} = \boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e$ ，其中 $\mathbf{G}_u = \text{diag}(\mathbf{h}_u^H) \mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$ ， $\mathbf{G}_e = \text{diag}(\mathbf{h}_e^H) \mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$ 分别表示BS-RISs-User和BS-RISs-Eve级联信道。

**评论1** 值得注意的是，在分布式多个RIS之间一般会存在互相干扰，通常情况下可以采用有目的的部署大规模RISs建立RIS之间的LOS链路或者采用主动RIS通常能够消除RIS之间的反射干扰<sup>[19]</sup>。但本文考虑的是被动的RIS工作，同时考虑RIS到

用户为视距路径，并且由于其工作在毫米波等高频频段以及RIS多跳路径损耗严重，因此可以忽略两次或两次以上的反射<sup>[20-22]</sup>。

由于完美CSI在实际RIS系统中很难获取，为此本文采用统计CSI误差模型表示信道传输特征

$$\mathbf{G}_u = \rho_u \bar{\mathbf{G}}_u + \hat{\mathbf{G}}_u \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_e = \rho_e \bar{\mathbf{G}}_e + \hat{\mathbf{G}}_e \quad (5)$$

其中，CSI误差向量满足 $\mathbf{g}_u \triangleq \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_u) \sim \mathcal{CN}(0, (1 - \rho_u^2) \mathbf{I}_{M \times N_t})$ ， $\mathbf{g}_e \triangleq \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) \sim \mathcal{CN}(0, (1 - \rho_e^2) \mathbf{I}_{M \times N_t})$ ， $\rho_u$ 和 $\rho_e$ 分别表示BS所获 $\mathbf{G}_u$ ， $\mathbf{G}_e$ 信道状态信息程度。则合法用户与窃听用户的信息速率分别为

$$R_u = \log_2(1 + \text{SINR}_u) \quad (6)$$

$$R_e = \log_2(1 + \text{SINR}_e) \quad (7)$$

其中， $\text{SINR}_u = \frac{\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_u}{\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_u + \sigma_u^2}$ ， $\text{SINR}_e = \frac{\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_e}{\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_e + \sigma_e^2}$ ， $\mathbf{W} = \mathbf{w}_u \mathbf{w}_u^H$ 。为了便于处理，采用信道平均SINR近似接收信号功率与噪声、干扰功率比的期望值<sup>[18]</sup>

$$\mathbb{E}[\text{SINR}_u] = \mathbb{E} \left[ \frac{\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_u}{\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_u + \sigma_u^2} \right] \quad (8)$$

$$\mathbb{E}[\text{SINR}_e] = \mathbb{E} \left[ \frac{\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_e}{\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_e + \sigma_e^2} \right] \quad (9)$$

对式(8)、式(9)进行合理的缩放

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\text{SINR}_u] &= \mathbb{E} \left[ \hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_u \right] \mathbb{E} \left[ \frac{1}{\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_u + \sigma_u^2} \right] \\ &\geq \frac{\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_u]}{\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_u] + \sigma_u^2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\text{SINR}_e] &= \mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_e] \mathbb{E} \left[ \frac{1}{\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_e + \sigma_e^2} \right] \\ &\geq \frac{\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_e]}{\mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_e] + \sigma_e^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式(10)、式(11)中等号成立是由于 $\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_u$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_u^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_u$ ， $\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_e$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_e^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_e$ 相互独立<sup>[23]</sup>。综上，对合法用户与窃听用户的信息速率表达式可进一步表示为

$$\bar{R}_u = \log_2(1 + \mathbb{E}[\text{SINR}_u]) \quad (12)$$

$$\bar{R}_e = \log_2(1 + \mathbb{E}[\text{SINR}_e]) \quad (13)$$

## 2.2 优化问题构建

考虑到优化系统网络中基站的波束成形 $\mathbf{W}$ ，AN矩阵 $\mathbf{Z}$ 和RISs的相移矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 等参数下，获得系统的最大安全传输速率可构建如式(14)的优化问题

$$\left. \begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}} \bar{R}_s = \bar{R}_u - \bar{R}_e \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \text{Tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Z}) \leq P_{\max} \\ & \text{C2: } |\phi_l|^2 = 1, \forall L \\ & \text{C3: } \mathbf{W} \geq 0, \mathbf{Z} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中,  $P_{\max}$  是基站的最大发射功率。由于非完美CSI引入的无穷多个不等式约束、RISs恒模限制以及非凸目标函数, 使用现有的算法无法直接获得问题P1的最优解。因此, 首先将P1转换为易于处理的优化

$\bar{R}_s = \log_2 \left( 1 + \frac{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H]}{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H] + \sigma_u^2} \right) - \log_2 \left( 1 + \frac{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H]}{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H] + \sigma_e^2} \right)$ , 引入松弛变量  $\alpha \geq 1$ , 将问题P2重新描述

$$\left. \begin{aligned} \text{P3: } & \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}} \log_2 \left( 1 + \frac{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H]}{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H] + \sigma_u^2} \right) - \log_2 \alpha \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2, C3} \\ & \text{C4: } \log_2 \left( 1 + \frac{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H]}{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H] + \sigma_e^2} \right) \leq \log_2 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

因对数函数  $f(x) = \log_2(1+x)$  关于  $x$  的单调性, 对P3目标函数进行合并并丢弃分子中的无关项  $\sigma_u^2$ , 优化问题P3可以进一步等价

$$\left. \begin{aligned} \text{P4: } & \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}} \frac{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) (\mathbf{W} + \mathbf{Z}) (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H]}{\alpha (\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H] + \sigma_u^2)} \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2, C3} \\ & \text{C4: } \frac{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H]}{\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H] + \sigma_e^2} \\ & \leq (\alpha - 1) (\text{E}[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H] + \sigma_e^2) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

为了简化优化问题P4的处理, 在此令

$$\begin{aligned} f_1 &= (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) (\mathbf{W} + \mathbf{Z}) (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H \\ &= \text{Tr}(\mathbf{G}_u (\mathbf{W} + \mathbf{Z}) \mathbf{G}_u^H \boldsymbol{\Theta} * \boldsymbol{\Theta}^T) \\ &\stackrel{(1)}{=} \text{vec}(\mathbf{G}_u)^H ((\mathbf{W} + \mathbf{Z})^T \otimes \boldsymbol{\Xi}) \text{vec}(\mathbf{G}_u) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H \\ &= \text{Tr}(\mathbf{G}_u \mathbf{Z} \mathbf{G}_u^H \boldsymbol{\Theta} * \boldsymbol{\Theta}^T) \\ &\stackrel{(1)}{=} \text{vec}(\mathbf{G}_u)^H ((\mathbf{Z})^T \otimes \boldsymbol{\Xi}) \text{vec}(\mathbf{G}_u) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} f_3 &= (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H \\ &= \text{Tr}(\mathbf{G}_e \mathbf{W} \mathbf{G}_e^H \boldsymbol{\Theta} * \boldsymbol{\Theta}^T) \\ &\stackrel{(1)}{=} \text{vec}(\mathbf{G}_e)^H ((\mathbf{W})^T \otimes \boldsymbol{\Xi}) \text{vec}(\mathbf{G}_e) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} f_4 &= (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_e)^H \\ &= \text{Tr}(\mathbf{G}_e \mathbf{Z} \mathbf{G}_e^H \boldsymbol{\Theta} * \boldsymbol{\Theta}^T) \\ &\stackrel{(1)}{=} \text{vec}(\mathbf{G}_e)^H ((\mathbf{Z})^T \otimes \boldsymbol{\Xi}) \text{vec}(\mathbf{G}_e) \end{aligned} \quad (21)$$

问题, 然后对处理后的优化问题采用相关优化方法。

### 3 系统的安全速率最大化

#### 3.1 优化问题处理

为了便于交替优化的应用, 本文首先将优化问题P1等价于优化问题P2, 即

$$\left. \begin{aligned} \text{P2: } & \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}} \bar{R}_s \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2, C3} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中,  $\boldsymbol{\Xi} = \boldsymbol{\Theta} * \boldsymbol{\Theta}^T \in C^{M \times M}$ , 步骤(1)满足  $\text{Tr}(\mathbf{A}^H \mathbf{B} \mathbf{C} \mathbf{D}) = \text{vec}(\mathbf{A})^H ((\mathbf{D})^T \otimes \mathbf{B}) \text{vec}(\mathbf{C})$ 。进一步将  $\mathbf{G}_e = \rho_e \bar{\mathbf{G}}_e + \hat{\mathbf{G}}_e, g_e \triangleq \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) \sim \mathcal{CN}(0, (1 - \rho_e^2) \mathbf{I}_{M \times N_t})$  代入式(20), 则有

$$\begin{aligned} \text{E}[f_3] &= \text{E}[\rho_e^2 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) \\ &+ 2\rho_e \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e) \\ &+ \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)] \\ &\stackrel{(2)}{=} \rho_e^2 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) \\ &+ \text{E}[\text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)] \end{aligned} \quad (22)$$

其中,  $\mathbf{S}_1 = ((\mathbf{W})^T \otimes \boldsymbol{\Xi}) \in C^{N_t M \times N_t M}$ , 且等号(2)是由于  $\hat{\mathbf{G}}_e$  均值为0。此外, 在式(22)中有

$$\begin{aligned} & \text{E}[\text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)] \\ & \stackrel{(3)}{=} \text{E}[\text{Tr}(\text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e))] \\ & \stackrel{(4)}{=} \text{E}[\text{Tr}(\mathbf{S}_1 \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e) \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)^H)] \\ & \stackrel{(5)}{=} (1 - \rho_e^2) \text{Tr}(\mathbf{S}_1) \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中, 步骤(3)遵循了变量  $\text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\hat{\mathbf{G}}_e)$  是一个标量这一事实。步骤(4)满足  $\text{Tr}(\mathbf{A} \mathbf{B}) = \text{Tr}(\mathbf{B} \mathbf{A})$ 。步骤(5)满足  $\text{E}[g_e g_e^H] = (1 - \rho_e^2) \mathbf{I}_{M \times N_t}$ ,  $\text{Tr}(\mathbf{A} \mathbf{B}) = \text{vec}(\mathbf{A}^*)^H \text{vec}(\mathbf{B})$ 。因此, 式(22)中有

$$\text{E}[f_3] = \rho_e^2 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_1 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) + (1 - \rho_e^2) \text{Tr}(\mathbf{S}_1) \quad (24)$$

同理, 式(18)、式(19)、式(21)中分别有:

$$\text{E}[f_1] = \rho_u^2 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_u)^H \mathbf{S}_3 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_u) + (1 - \rho_u^2) \text{Tr}(\mathbf{S}_3) \quad (25)$$

$$\text{E}[f_2] = \rho_u^2 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_u)^H \mathbf{S}_2 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_u) + (1 - \rho_u^2) \text{Tr}(\mathbf{S}_2) \quad (26)$$

$$E[f_4] = \rho_e^{2\text{vec}}(\bar{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{S}_2 \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) + (1 - \rho_e^2) \text{Tr}(\mathbf{S}_2) \quad (27)$$

其中,  $\mathbf{S}_2 = ((\mathbf{Z})^T \otimes \mathbf{\Xi}) \in \mathbb{C}^{N_t M \times N_t M}$ ,  $\mathbf{S}_3 = ((\mathbf{W} + \mathbf{Z})^T \otimes \mathbf{\Xi}) \in \mathbb{C}^{N_t M \times N_t M}$ 。为了处理优化问题的目标函数式(17), 在此引入一个松弛变量 $\beta$ 。 $\mathbf{Q}_A = \beta \mathbf{S}_1$ ,  $\mathbf{Q}_B = \beta \mathbf{S}_2$ ,  $\mathbf{Q}_C = \beta \mathbf{S}_3$ , 其中 $\mathbf{Q}_A \geq 0$ ,  $\mathbf{Q}_B \geq 0$ ,  $\mathbf{Q}_C \geq 0$ ,  $\beta > 0$ 。根据Charnes-Cooper变换可将优化问题P4改写为

$$\left. \begin{aligned} \text{P5: } & \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}, \alpha, \beta} \beta \sigma_u + \Gamma_u(\mathbf{Q}_C) \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2} \\ & \text{C5: } \alpha(\beta \sigma_u + \Gamma_u(\mathbf{Q}_B)) = 1 \\ & \text{C6: } \Gamma_e(\mathbf{Q}_A - (\alpha - 1)\mathbf{Q}_B) \leq \beta \sigma_u (\alpha - 1) \\ & \text{C7: } \mathbf{Q}_A \geq 0, \mathbf{Q}_B \geq 0, \mathbf{Q}_C \geq 0, \beta \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

由于优化问题式(28)必须为正, 故约束条件C7中 $\beta > 0$ 可以替换为 $\beta \geq 0$ 。对于任意方阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N_t M \times N_t M}$ , 令

$$\begin{aligned} \Gamma_u(\mathbf{A}) &= E[\text{vec}(\mathbf{G}_u)^H \mathbf{A} \text{vec}(\mathbf{G}_u)] \\ &= \rho_u^{2\text{vec}}(\bar{\mathbf{G}}_u)^H \mathbf{A} \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_u) + (1 - \rho_u^2) \text{Tr}(\mathbf{A}) \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Gamma_e(\mathbf{A}) &= E[\text{vec}(\mathbf{G}_e)^H \mathbf{A} \text{vec}(\mathbf{G}_e)] \\ &= \rho_e^{2\text{vec}}(\bar{\mathbf{G}}_e)^H \mathbf{A} \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) + (1 - \rho_e^2) \text{Tr}(\mathbf{A}) \quad (30) \end{aligned}$$

注意到, 由于非凸约束C5, C6、单位模量约束C2, 优化问题P5仍然是非凸的。因此, 2.2节采用交替优化(Alternating Optimization, AO)方法来优化求解变量 $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}, \alpha, \beta$ 。

### 3.2 优化变量求解

问题P5中采用AO算法优化各变量时, 主要由3步优化组成: (1)固定变量 $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}, \beta$ , 问题P5优化问题转化为单变量 $\alpha$ 优化问题。此时, 可在 $\alpha$ 上执行一维线性搜索得到所求解。(2)固定变量 $\boldsymbol{\Theta}, \alpha$ , 使用半正定规划(SemiDefinite Program, SDP)方法可有效求解关于 $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \beta$ 的问题。(3)固定变量 $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \alpha, \beta$ , 通过使用PCCP算法可获得 $\boldsymbol{\Theta}$ 。

步骤1 中对于松弛变量 $\alpha$ , 为了确保系统SR非负, 有

$$\begin{aligned} & \log_2 \left( 1 + \frac{E[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H]}{E[(\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{G}_u)^H] + \sigma_u^2} \right) \leq \log_2 \alpha \\ & \Rightarrow \alpha \stackrel{(6)}{\leq} 1 + \frac{(\boldsymbol{\Theta}^T \bar{\mathbf{G}}_u) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \bar{\mathbf{G}}_u)^H}{(\boldsymbol{\Theta}^T \bar{\mathbf{G}}_u) \mathbf{Z} (\boldsymbol{\Theta}^T \bar{\mathbf{G}}_u)^H + \sigma_u^2} \\ & \leq 1 + (\boldsymbol{\Theta}^T \bar{\mathbf{G}}_u) \mathbf{W} (\boldsymbol{\Theta}^T \bar{\mathbf{G}}_u)^H \\ & \stackrel{(7)}{\leq} 1 + P_{\max} M \|\bar{\mathbf{G}}_u\|^2 \quad (31) \end{aligned}$$

其中不等式(6)是由于 $\rho_u \leq 1$ , 不等式(7)遵循 $\text{Tr}(\mathbf{W}) \leq$

$P_{\max}$ ,  $\text{Tr}(\mathbf{\Xi}) = M$ , 当且仅当 $\mathbf{S}_1 = P_{\max} M \frac{\bar{\mathbf{G}}_u \bar{\mathbf{G}}_u^H}{\|\bar{\mathbf{G}}_u\|^2}$ 时, 等式成立。因此, 重写问题P5

$$\left. \begin{aligned} \text{P6: } & \max_{\alpha} f(\alpha) \\ \text{s.t. } & \text{C8: } 1 \leq \alpha \leq 1 + M P_{\max} \|\bar{\mathbf{G}}_u\|^2 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

其中,  $f(\alpha)$ 表示固定 $\alpha$ 时目标函数的最优值

$$\left. \begin{aligned} \text{P7: } & \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}, \beta} \beta \sigma_u^2 + \Gamma_u(\mathbf{Q}_C) \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2, C5, C6, C7} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

步骤2 在问题(33)中, 先固定 $\boldsymbol{\Theta}$ , 则P7可重写为

$$\left. \begin{aligned} \text{P8: } & \max_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \beta} \beta \sigma_u^2 + \Gamma_u(\mathbf{Q}_C) \\ \text{s.t. } & \text{C1, C5, C6, C7} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

问题式(34)为SDP问题, 通过使用CVX来解决。

步骤3 在问题式(33)中, 结合步骤1,2, 有关RISs的相移参数 $\boldsymbol{\Theta}$ 的优化子问题可重写为

$$\left. \begin{aligned} \text{P9: } & \max_{\boldsymbol{\Theta}} \beta \sigma_u^2 + \Gamma_u(\mathbf{Q}_C) \\ \text{s.t. } & \text{C2, C5, C6, C7} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

注意到, 由于单位模量约束C2, 问题P9仍是非凸的。因此, 采用PCCP方法来处理C2。首先, 将约束条件 $|\phi_l|^2 = 1, \forall l$ 等价地转换为 $1 \leq |\phi_{l,m}|^2 \leq 1, \forall l, m$ 。其次, 可将所得约束的非凸部分线性化为 $|\phi_{l,m}^{[i]}|^2 - 2\text{Re}(\phi_{l,m}^{[*]} \phi_{l,m}^{[i]}) \leq -1, \forall l, m$ , 其中 $\phi_{l,m}^{[i]}$ 为迭代第 $i$ 次的解。最后, 为获得 $\phi_l$ 可以通过解决优化问题

$$\left. \begin{aligned} \text{P10: } & \max_{\boldsymbol{\Theta}, \mathbf{b}} \beta \sigma_u^2 + \Gamma_u(\mathbf{Q}_C) - \gamma^{[i]} \sum_{m=1}^{2M} b_m \\ \text{s.t. } & \text{C5, C6, C7} \\ & \text{C9: } |\phi_{l,m}^{[i]}|^2 - 2\text{Re}(\phi_{l,m}^{[*]} \phi_{l,m}^{[i]}) \leq b_m - 1, \forall l, m \\ & \text{C10: } |\phi_{l,m}|^2 \leq 1 + b_{M+m}, \forall l, m \\ & \text{C11: } b_m \geq 0, \forall m \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

其中,  $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_{2M}]^T$ 是施加在等价线性约束C9上的松弛变量,  $\|\mathbf{b}\|_1$ 是目标函数中的惩罚项。 $\|\mathbf{b}\|_1$ 通过正则化因子 $\gamma^{[i]}$ 进行缩放, 以便保证约束条件的可行性。具体求解 $\phi_l$ 步骤可参考文献[24]。

综上, 在AO框架下, 问题式(28)通过上述3个步骤迭代依次求解 $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \boldsymbol{\Theta}, \alpha, \beta$ 各变量。

### 3.3 算法及复杂性分析

结合2.1, 2.2节, 对整体问题优化, 应用交替迭代优化算法, 以确保收敛到至少1个局部最优解。将交替迭代算法的详细步骤总结在[算法1](#)中。根据整体算法分析, 可获得优化算法的复杂度。

**评论2** 本算法复杂度主要是优化问题P8与P10:

### 算法1 AO整体算法流程

输入: 迭代次数  $r = 0$ , 初始值  $\mathbf{W}^0, \mathbf{Z}^0, \Theta^0, \alpha^0, \beta^0$ , 容错误差  $\varepsilon > 0$ ;

步骤1 循环执行操作:

- (1) 固定变量  $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \Theta, \beta$ , 在问题P6中对  $\alpha$  执行一维线性搜索;
- (2) 固定变量  $\Theta, \alpha$ , 使用CVX工具箱求解问题P8中的参数  $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \beta$ ;
- (3) 固定变量  $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \alpha, \beta$ , 对问题P10采用PCCP方法获得  $\Theta$ ;

直到收敛:  $\frac{|\bar{R}_s^r - \bar{R}_s^{r-1}|}{R_s^r} \leq \varepsilon$ ;

输出: 参数  $\mathbf{W}, \mathbf{Z}, \Theta, \alpha, \beta$ .

P8的复杂度为  $C_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}} = O(\sqrt{5N_t M} n_1 (n_1^2 + 5n_1 N_t^2 M^2 + 5N_t^3 M^3))$ ,  $n_1 = 2N_t M$ , 问题P10的复杂度为  $C_{\Theta} = O(\sqrt{5N_t M} + 2M n_2 (n_2^2 + 5n_2 N_t^2 M^2 + 5N_t^3 M^3 + n_2 M))$  其中  $n_2 = M$ . 综上, 每迭代1次AO框架方法的近似复杂度为  $C_{\Theta} + C_{\mathbf{W}, \mathbf{Z}}$ .

## 4 仿真和实验分析

本节针对多RIS系统进行仿真实验分析, 通过仿真分析方案的系统性能。在仿真系统场景中, 假设BS位于2维坐标(0 m, 0 m), 合法用户与窃听用户随机分布在以(40 m, 0 m)为中心, 半径取3 m的圆内。RISs ( $L = 3$ )时, 取纵坐标固定数值5 m, 横坐标10 m为间隔平均分布于基站与用户间; RISs ( $L = 2$ )时, 取纵坐标固定数值5 m, 横坐标20 m为间隔平均分布于基站与用户间; RIS ( $L = 1$ )时位于(35 m, 5 m)。

考虑实际情况, 本系统中我们假设合法信道与窃听信道, 也即信道  $G_u$  和  $G_e$  存在大规模衰落与小尺度衰落。其中系统中的大规模衰落模型在此表示为  $PL = -PL_0 - 10\bar{\alpha} \lg(d)$  dB, 其中  $\bar{\alpha}$  为路径损失指数,  $d$  为相对应的传输链路距离。进一步系统中信道  $G_u, G_e$  的小尺度衰落服从瑞利衰落分布。对于统计CSI误差模型, CSI误差向量满足

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{g}_u &\triangleq \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_u) \sim \mathcal{CN}(0, (1 - \rho_u^2) \mathbf{I}_{M \times N_t}) \\ \mathbf{g}_e &\triangleq \text{vec}(\bar{\mathbf{G}}_e) \sim \mathcal{CN}(0, (1 - \rho_e^2) \mathbf{I}_{M \times N_t}) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

其中, 设  $\delta_u^2 = (1 - \rho_u^2)$ ,  $\delta_e^2 = (1 - \rho_e^2)$  分别为BS所获知的  $G_u, G_e$  信道状态信息的不确定程度,  $\delta_u \in [0, 1)$ ,  $\delta_e \in [0, 1)$ 。此外, 系统中的仿真所用其他参数如表1所列。

本节中分析比较所提方案与两种传统的基准方案。其中对比方案1: 随机优化RIS相移算法(Random), 对于预编码矩阵  $\mathbf{W}, \mathbf{Z}$ , 采用CVX工具箱求解。对于RISs相移矩阵  $\Theta_l, \forall l$  由  $[0, 2\pi)$  随机生成; 对比方案2: 无AN辅助通信(No-AN), 即基站

端不发送AN信号干扰窃听用户。对基站的预编码矩阵  $\mathbf{W}$  采用CVX工具箱求解, 对RISs相移矩阵  $\Theta_l, \forall l$  采用本章所提PCCP算法求解。

图2在RIS单元总数目  $M = 24$  情况下, 比较分析了3种设计方案所取得的系统安全传输速率与迭代次数的关系: 分布式个数分别为1, 2和3时, (即:  $L = 1, 2, 3$ ) 本文所提策略(Proposed);  $L = 3$  时采用Random策略以及  $L = 3$  时采用No-AN策略。从图中可以看出: (1) 本文所提算法随着算法迭代次数的增加, 系统总安全速率均收敛。RIS取  $L = 1, 2, 3$  不同个数时, 系统安全速率收敛值随个数增加而增加, 且迭代4~5次后收敛; (2)  $L = 3$  时, 本文所提方案收敛的数值优于Random方案和No-AN方案收敛数值。这说明了在非完美CSI下, 本文所提优化方案能够取得最大的安全传输速率, 即本文所提方案相对于传统方案能够有效提高系统安全性能; (3)  $L = 3$  时, No-AN方案收敛数值优于Random方案收敛数值。这说明了RISs相移优化对提高非完美CSI通信系统安全性能的重要性。

图3比较了3种设计方案系统的安全速率与基站发射功率之间关系。从中可以看出: (1) 本文所提算法安全速率随着基站发射功率的增加而增加。其

表1 参数设置

参数变量	对应数值
带宽	$B = 1$ MHz
噪声功率谱密度	$\sigma_k^2 = \sigma_e^2 = -174$ dBm/Hz
容错误差	$\varepsilon = 10^{-6}$
路径损耗指数	$\alpha_{BI} = \alpha_{IRS} = 2.2$
BS最大发射功率	$P_{\max} = 10$ dBm
基站天线数	$N_t = 4$
总RIS单元数	$M = 24$
CSI不确定程度	$\delta_u = 0.2, \delta_e = 0.2$

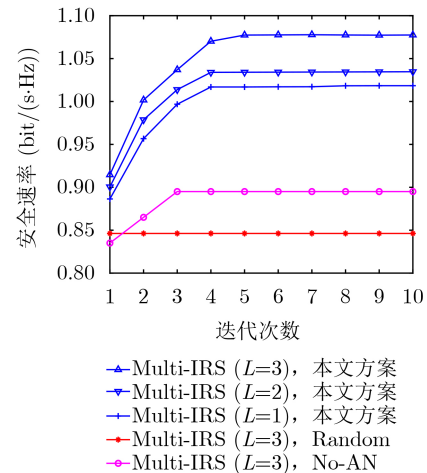


图2 系统的安全速率与算法迭代次数的关系

中，RIS取 $L = 3$ 时，系统安全速率随功率增长的优势愈加明显。这体现了分布式部署RIS的优势；(2)RIS个数 $L = 3$ 时，相对于基于AN的传输方案(即本文所提算法和Random方案)，No-AN方案的安全速率随基站发射功率的增加而缓慢增加。再次说明利用AN对于安全传输策略的有效性；(3)随着基站发射功率的增加，RIS个数 $L = 3$ 时Random方案的安全速率先增加后趋于平缓。这说明了随机生成RISs相移对提高系统安全速率存在一定的限制。

图4比较了3种设计方案中系统的安全速率与RIS个数、总反射单元数关系。从中可以看出：(1)随着总反射单元数的增加，3种不同部署情况下的安全速率均提高。进一步说明RIS可以有效提高系统的安全传输速率，且本文提出的方案能够取得最优的安全性能；(2) $L = 3$ 时随着总反射单元数的增加，相对于Random方案以及No-AN方案，本文提出的方案安全优势更加明显。进一步说明本文采用的基于AN策略的优势。

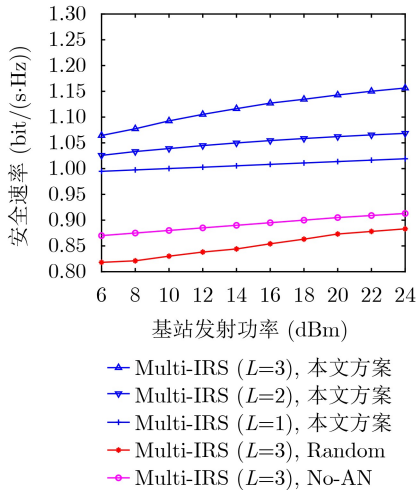


图3 系统的安全速率与基站发射功率的关系

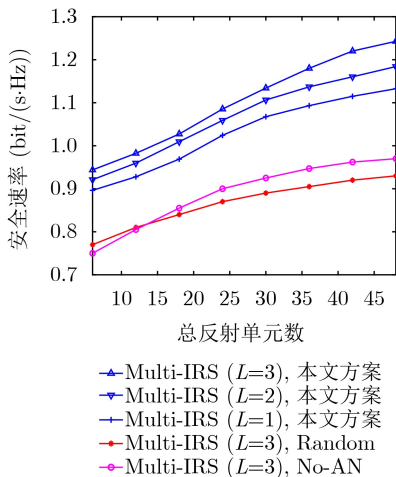


图4 系统的安全速率与RISs总反射单元数的关系

图5分析了在不同的CSI情况下系统安全传输速率与基站发射功率之间的关系。从图中可以看出：(1)当基站获取到合法用户的完美CSI(即 $\delta_u = 0$ )时，窃听用户CSI不确定程度 $\delta_e = 0.1$ 随发射功率增长趋势较 $\delta_e = 0.2$ 随发射功率增长趋势要好。这主要是由于当窃听者信道上的信道不确定性水平变小时，通过提高基站的传输功率来提高合法用户信号接收的效率会变得更更高；(2)当 $\delta_e$ 不变时(即 $\delta_e$ 取0.1或者 $\delta_e$ 取0.2)时， $\delta_u = 0.1$ 时的系统安全性能比 $\delta_u = 0.2$ 的安全性能更好。这是因为当合法用户信道不确定性增大( $\delta_u$ 从0升至0.1或0.2)时，导致系统发送的AN干扰信号不能完全投射到合法用户信道零空间中。进一步导致系统安全性能的下降。说明更加精确的CSI性能估计能够使得系统提高信息的安全传输速率，也即有效提高系统的传输安全性能。

图6比较了所提算法与No-AN方案：(1)本文所提算法与No-AN方案在 $\delta_u = \delta_e = 0.1$ 时所获性能均

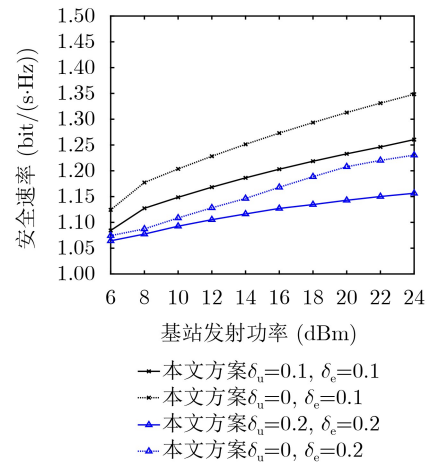


图5 系统的安全速率与系统CSI不确定性关系

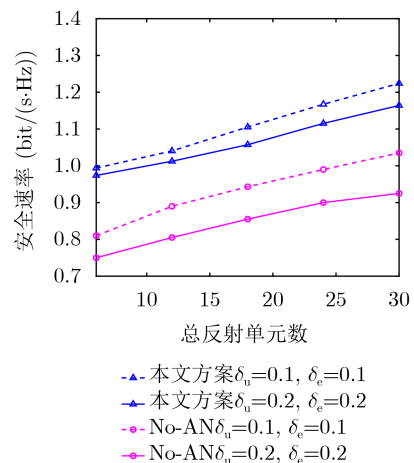


图6 系统的安全速率与系统CSI不确定性关系

比 $\delta_n = \delta_e = 0.2$ 时好,且 $\delta_n = \delta_e = 0.1$ 时,随着总反射单元数增加所对应系统的安全性能涨幅更快。表明增加RIS单元数目能够有效提升系统安全;(2)相比No-AN方案,当 $\delta_n = \delta_e = 0.2$ 减至 $\delta_n = \delta_e = 0.1$ 时,所提方案随着总反射面单元数增加安全性能优势更加明显。这也说明所提方案为系统提供了一个更加安全鲁棒的传输策略。

## 5 结论

本文研究了非完美CSI下分布式RISs辅助安全通信系统。为分析所提方案在非完美CSI误差下安全性能,采用交替优化算法、CVX优化以及惩罚凹凸法优化有效求解所构建的优化方程。最后仿真结果表明:本文算法为MISO场景提供一个具有鲁棒性的安全传输方案;系统中所用的AN方法能够有效阻碍窃听用户的信息截获,有效提高系统传输安全;系统信道的CSI不确定程度越低,系统的安全性能越好。相比其它传输方案,本文所提方案具有更好的鲁班性和安全性。

## 参 考 文 献

- [1] CHRAITI M, GHAYEB A, and ASSI C. Achieving full secure degrees-of-freedom for the MISO wiretap channel with an unknown eavesdropper[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(11): 7066–7079. doi: [10.1109/TWC.2017.2738638](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2738638).
- [2] HE Xiang and YENER A. MIMO wiretap channels with unknown and varying eavesdropper channel states[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(11): 6844–6869. doi: [10.1109/TIT.2014.2359192](https://doi.org/10.1109/TIT.2014.2359192).
- [3] 冯友宏, 张彦峨, 董国青. 基于分布式智能反射面的物理层安全通信研究[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(6): 2081–2088. doi: [10.11999/JEIT220659](https://doi.org/10.11999/JEIT220659).  
FENG Youhong, ZHANG Yan'e, and DONG Guoqing. Research on physical layer security communication based on distributed intelligent reflective surface[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(6): 2081–2088. doi: [10.11999/JEIT220659](https://doi.org/10.11999/JEIT220659).
- [4] WU Qingqing, ZHANG Shuowen, ZHENG Beixiong, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3313–3351. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3051897](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3051897).
- [5] LV Lu, WU Qingqing, LI Zan, et al. Covert communication in intelligent reflecting surface-assisted NOMA systems: Design, analysis, and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(3): 1735–1750. doi: [10.1109/TWC.2021.3106346](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3106346).
- [6] SHEN Hong, XU Wei, GONG Shulei, et al. Secrecy rate maximization for intelligent reflecting surface assisted multi-antenna communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(9): 1488–1492. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2924214](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2924214).
- [7] CUI Miao, ZHANG Guangchi, and ZHANG Rui. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410–1414. doi: [10.1109/LWC.2019.2919685](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2919685).
- [8] DONG Limeng and WANG Huiming. Enhancing secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(11): 7543–7556. doi: [10.1109/TWC.2020.3012721](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3012721).
- [9] QIAO Jingping and ALOUINI M S. Secure transmission for intelligent reflecting surface-assisted mmWave and terahertz systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(10): 1743–1747. doi: [10.1109/LWC.2020.3003400](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3003400).
- [10] CHU Zheng, HAO Wanming, XIAO Pei, et al. Intelligent reflecting surface aided multi-antenna secure transmission[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(1): 108–112. doi: [10.1109/LWC.2019.2943559](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2943559).
- [11] MEI Weidong and ZHANG Rui. Multi-beam multi-hop routing for intelligent reflecting surfaces aided massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(3): 1897–1912. doi: [10.1109/TWC.2021.3108020](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3108020).
- [12] XIU Yue, ZHAO Jun, YUEN C, et al. Secure beamforming for multiple intelligent reflecting surfaces aided mmWave systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(2): 417–421. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3028135](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3028135).
- [13] YU Xianghao, XU Dongfang, and SCHÖBER R. Enabling secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[C]. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Waikoloa, USA, 2019: 1–6. doi: [10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014322](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014322).
- [14] WANG Huiming, BAI Jiiale, and DONG Limeng. Intelligent reflecting surfaces assisted secure transmission without eavesdropper's CSI[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 1300–1304. doi: [10.1109/LSP.2020.3010170](https://doi.org/10.1109/LSP.2020.3010170).
- [15] YU Xianghao, XU Dongfang, SUN Ying, et al. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2637–2652. doi: [10.1109/JSAC.2020.3007043](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007043).
- [16] YANG Liang, YANG Jinxia, XIE Wenwu, et al. Secrecy performance analysis of RIS-aided wireless communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 12296–12300. doi: [10.1109/TVT.2020.3007521](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3007521).
- [17] HONG Sheng, PAN Cunhua, REN Hong, et al. Robust transmission design for intelligent reflecting surface-aided secure communication systems with imperfect cascaded



- CSI[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(4): 2487–2501. doi: [10.1109/TWC.2020.3042828](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3042828).
- [18] XU Peng, CHEN Gaojie, PAN Gaofeng, *et al.* Ergodic secrecy rate of RIS-assisted communication systems in the presence of discrete phase shifts and multiple eavesdroppers[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(3): 629–633. doi: [10.1109/LWC.2020.3044178](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3044178).
- [19] YANG Songjie, LYU Wanting, XIU Yue, *et al.* Active 3D Double-RIS-Aided multi-user communications: Two-timescale-based separate channel estimation via Bayesian learning[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(6): 3605–3620. doi: [10.1109/TCOMM.2023.3265115](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3265115).
- [20] ZHANG Zhengquan, XIAO Yue, MA Zheng, *et al.* 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28–41. doi: [10.1109/MVT.2019.2921208](https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208).
- [21] HUANG Chongwen, HU Sha, ALEXANDROPOULOS G C, *et al.* Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(5): 118–125. doi: [10.1109/MWC.001.1900534](https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900534).
- [22] YOON S H, LIM B, VU M, *et al.* Joint user selection and beamforming design for multi-IRS aided internet-of-things networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, doi: [10.1109/TVT.2023.3313606](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3313606).
- [23] MEI Weidong and ZHANG Rui. Performance analysis and user association optimization for wireless network aided by multiple intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 6296–6312. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3087620](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3087620).
- [24] ZHOU Gui, PAN Cunhua, REN Hong, *et al.* A framework of robust transmission design for IRS-aided MISO communications with imperfect cascaded channels[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 5092–5106. doi: [10.1109/TSP.2020.3019666](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3019666).
- 冯友宏：男，教授，博士生导师，研究方向为5G/6G移动通信、智能通信、网络安全。
- 张彦峨：女，硕士生，研究方向为5G/6G移动通信、信息论安全。
- 张玉峰：男，博士生，研究方向为5G/6G移动通信、智能通信。
- 董国青：女，博士生，研究方向为5G/6G移动通信、智能通信。
- 张 然：女，讲师，研究方向为智能反射面，毫米波通信。
- 王 晔：男，讲师，研究生导师，研究方向为无人机通信。
- 徐龙珠：女，硕士生，研究方向为5G/6G移动通信、信息论安全。

责任编辑：余 蓉