

RIS辅助的MIMO系统安全鲁棒资源分配算法

李国权^{*1,2} 刘婷¹ 刘梦洁¹ 庞宇² 林金朝^{1,2}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2. 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 信息业务的快速发展使得无线通信系统对频谱效率和系统容量的要求更高。可重构智能表面 (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) 能够通过调整反射单元的反射系数来重新配置无线传输环境, 从而有效提升系统性能和频谱效率。然而, 无线信道的开放性使得传输数据的安全性无法得到有效保证。物理层安全 (Physical Layer Security, PLS) 技术充分利用无线信道的物理特性对传输信息进行加密, 是从物理层解决无线通信易受到窃听攻击的重要手段, 但其安全性能又受到用户信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 的影响。针对无线通信系统的高频谱效率需求和用户 CSI 不完美导致的系统安全性能损失较大的问题, 构建了一个存在多个窃听用户的RIS辅助多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统模型, 并提出了一种安全鲁棒资源分配算法。首先, 在基站 (Base Station, BS) 发射功率和RIS相移约束下, 针对窃听用户 CSI 不完美的情况, 建立了一个联合优化BS天线功率分配和RIS无源波束成形最大化合用户保密速率的资源分配模型。随后, 提出了一种针对上述多变量耦合的具有无穷多非凸约束的非凸问题求解算法。针对多变量耦合难以求解的问题, 利用交替优化方法将原问题转化为了BS发射协方差矩阵优化和RIS相移优化两个子问题, 并采用Charnes-Cooper变换、S-Procedure方法和基于惩罚函数的凸差算法分别转化为凸优化问题完成问题求解。最后通过收敛性和复杂度分析, 证明了算法的可行性和有效性。仿真结果表明, 所提算法在存在多窃听用户和窃听信道有界不确定性的情况下具有更优的合法用户保密速率和鲁棒性。

关键词: 多输入多输出; 可重构智能表面; 鲁棒资源分配; 非完美信道状态信息; 保密速率

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **DOI:** 10.12466/xhcl.2025.03.008

引用格式: 李国权, 刘婷, 刘梦洁, 等. RIS辅助的MIMO系统安全鲁棒资源分配算法[J]. 信号处理, 2025, 41(3): 504-514. DOI: 10.12466/xhcl.2025.03.008.

Reference format: LI Guoquan, LIU Ting, LIU Mengjie, et al. Secure robust resource allocation algorithm for RIS-assisted MIMO systems[J]. Journal of Signal Processing, 2025, 41(3): 504-514. DOI: 10.12466/xhcl.2025.03.008.

Secure Robust Resource Allocation Algorithm for RIS-Assisted MIMO Systems

LI Guoquan^{*1,2} LIU Ting¹ LIU Mengjie¹ PANG Yu² LIN Jinzhao^{1,2}

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology, Chongqing 400065, China)

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-06-25

*通信作者: 李国权 ligq@cqupt.edu.cn *Corresponding Author: LI Guoquan, ligq@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (U21A20447); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2020jcyj-cxttX0002, CSTB2023NSCQ-LZX0105)
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (U21A20447); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2020jcyj-cxttX0002, CSTB2023NSCQ-LZX0105)

Abstract: The rapid development of communication services has made wireless communication systems more demanding in terms of spectral efficiency and system capacity. A Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) can reconfigure the wireless transmission environment by adjusting the reflection coefficients of the reflection units, thus effectively improving the system performance and spectrum efficiency. However, the openness of the wireless channel makes it impossible to guarantee the security of the transmitted data. Physical Layer Security (PLS) technology fully leverages the physical characteristics of the wireless channel to encrypt the transmission information, which is a crucial means to solve the problem of wireless communications being vulnerable to eavesdropping attacks from the physical layer, but its security performance is affected by the Channel State Information (CSI) of the user. Aiming at the high spectral efficiency demand of wireless communication systems and the large loss of system security performance caused by the imperfect CSI of users, an RIS-assisted Multiple Input Multiple Output (MIMO) system model with the presence of multiple eavesdropping users is constructed, and a security robust resource allocation algorithm is proposed. First, a resource allocation model that jointly optimizes the Base Station (BS) antenna power allocation and RIS passive beamforming to maximize the secrecy rate of legitimate users is developed for the imperfect CSI of eavesdropping users under the BS transmit power and RIS phase shift constraints. Subsequently, an algorithm for solving the nonconvex problem with infinitely many nonconvex constraints for the above multivariate coupling is proposed. For problems that are difficult to solve with multivariate coupling, the original problem is transformed into two subproblems of BS emission covariance matrix optimization and RIS phase-shift optimization using alternate optimization method, and the problem is completed by transforming it into a convex optimization problem using the Charnes-Cooper transform, S-Procedure method, and the convex difference algorithm based on the penalty function, respectively. Finally, the feasibility and effectiveness of the algorithm are proven by convergence and complexity analysis. Simulation results show that the proposed algorithm has a better legitimate user secrecy rate and robustness in the presence of multiple eavesdropping users and a bounded uncertainty of the eavesdropping channel.

Key words: multiple input multiple output; reconfigurable intelligent surface; robust resource allocation; imperfect channel state information; secrecy rate

1 引言

随着信息技术的不断发展,人们对移动数据业务的需求急速增长,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术成为提升频谱效率及系统容量以满足无线通信业务需求的关键途径^[1]。然而,无线信道的开放性使得通信易遭窃听。物理层安全(Physical Layer Security, PLS)技术,通过利用无线信道的物理特性对信息传输加密,为无线系统的安全通信提供了坚实的保障^[2]。其中,资源分配方法因其能够有效提升系统保密能力而得到了广泛应用^[3]。

近年来,可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)^[4-5]因其改善无线传播环境的独特能力,而备受瞩目。RIS由众多低成本、无源反射单元组成,通过灵活调整反射单元的反射系数,它可以实现不同接收机处反射信号的增强或减弱。然而,当合法用户和窃听用户距离较近或信道高度相关时,即使采用PLS技术,系统的保密速率也受到限制^[6]。因此,可将RIS与PLS相结合以处理窃听攻击问题^[7]。

文献[8]考虑了合法用户配备单天线,而窃听用户配备多天线的RIS辅助多输入单输出(Mul-

tle Input Single Output, MISO)系统。为简化分析,该研究将配备多天线的窃听视作多个单天线窃听的集合,推导出了最优发射波束形成向量,并提出了一种基于分数阶规划和流形优化的低复杂度算法。针对存在窃听的RIS辅助MIMO系统,文献[9]同时考虑直射和反射路径,提出了一种基于块连续最大化的迭代方法,其中每次迭代都以封闭的形式进行,通过联合优化发射协方差矩阵和RIS相移最大化可实现保密速率。文献[10]考虑了RIS辅助的多载波MIMO正交频分复用系统,提出了一种基于交替优化的非精确块坐标下降算法最大化和保密速率。文献[11]研究了RIS辅助的多用户MIMO无线供电通信网络和保密速率最大化问题,基于次梯度法优化下行发射协方差矩阵和上行波束形成矩阵,基于最大化最小化算法优化相移矩阵。文献[12]提出了一种新的RIS后向散射增强策略来抵御MIMO通信系统中的窃听和干扰攻击,其中RIS将干扰信号全部调制成期望信号,通过联合优化基站(Base Station, BS)上的主动波束形成和RIS后向散射系数,最大化系统保密率。文献[13]考虑了窃听和合法用户各自有一个RIS辅助的多流MIMO系统,提出了一种合法系统与窃听系统中预

编码、人工噪声(Artificial Noise, AN)、接收器处的线性组合器和RIS波束形成的联合设计方案从而增强系统安全性能。在考虑RIS离散相移的情况下,文献[14]利用旋转矩阵和粒子群算法最大化RIS辅助的非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)MIMO系统保密和速率。相比传统优化方法提升算法性能的同时复杂度更低。

在之前的研究工作中,通常假设BS能获取完整的信道状态信息(Channel State Information, CSI),但实际情况中,由于无源RIS不能发送和接收导频信号、窃听用户静默、估计误差、量化误差和反馈延迟,BS难以获得完整的CSI^[15]。不准确的CSI会导致设计的优化算法存在误差,系统性能不能到达最优。考虑存在外部窃听且窃听用户CSI完全未知的情况,文献[2]研究了NOMA-MISO系统安全通信问题,通过引入对合法用户无害的AN来削弱窃听以减轻信息泄露。文献[16]考虑窃听用户信道有界不确定性,提出了一种安全鲁棒波束赋形算法优化RIS辅助MISO系统的保密速率。文献[17]在MISO无线携能通信系统中引入可同时透射和反射RIS(Simultaneously Transmitting And Reflecting RIS, STAR-RIS),提出了一种鲁棒的资源分配算法,旨在提升用户CSI不完美场景下系统的安全性能。对于RIS辅助的MIMO系统,文献[18]构建了合法用户和窃听用户各有一个RIS辅助的窃听模型,同时考虑窃听用户只有统计CSI,引入AN最大化保密率。文献[19]则考虑了全部CSI已知和没有窃听用户CSI两种情况,全部CSI已知时采用交替优化算法最大化保密速率,没有窃听用户CSI时引入人工噪声,在合法用户服务质量约束下最小化其发射功率,剩余功率用于生成人工噪声干扰窃听用户。

引入AN解决窃听用户CSI不完美时的安全通信问题固然一定程度上是有效的,但增加了能耗,并且当合法用户信道和窃听用户信道差异很小时,波束成形往往会失效。此外,在现有研究中,关于RIS辅助的MIMO系统物理层安全问题的探讨主要局限于单个窃听用户的场景。然而,在实际情况下,合法用户可能会面临多个窃听用户的同时监听。因此,研究多窃听场景下的物理层安全问题对于提高RIS辅助MIMO系统的安全性至关重要。

为解决CSI不完美带来的性能损失并提高系统的安全性,本文针对存在多个窃听用户的RIS辅助MIMO无线通信系统,提出了一种窃听用户CSI不

完美情况下的MIMO系统安全鲁棒资源分配算法。主要贡献如下:

(1)建立了存在多个窃听用户的RIS辅助MIMO系统的无线传输模型,考虑窃听用户CSI不完美并基于有界信道不确定性,构建了满足RIS相移、基站发射功率约束的保密速率最大化问题。

(2)提出了一种针对上述多变量耦合的具有无穷多非凸约束的非凸问题求解算法。首先进行等价代换以简化目标函数,针对多变量耦合问题,将原问题分解为BS发射协方差矩阵优化子问题和RIS相移优化子问题交替优化。然后,使用Charnes-Cooper变换、S-Procedure方法和基于惩罚函数的凸差算法分别将两个子问题转化为凸优化问题并完成问题求解。

(3)对建立模型和所提算法进行了仿真验证。结果表明,本文算法具有更好的收敛性、较高的安全性和较强的鲁棒性。

2 系统模型

图1给出了RIS辅助的下行MIMO通信系统模型,该模型由 N_b 根发射天线的BS、含 M 个反射单元的RIS、 N_l 根接收天线的合法用户和 E 个 N_e 根接收天线的窃听用户组成。假设所有信道均为准静态平坦衰落模型^[16]。

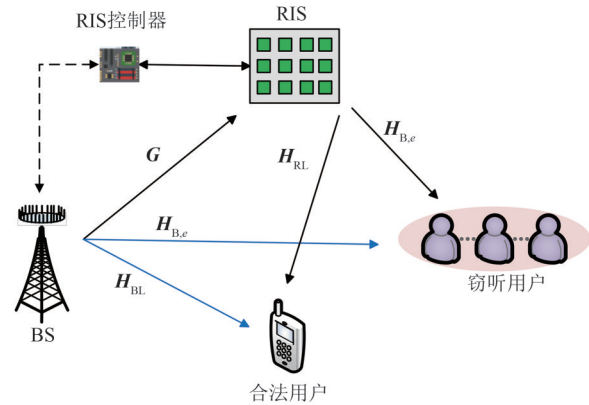


图1 RIS辅助的MIMO通信系统模型

Fig. 1 RIS-assisted modeling of MIMO communication systems

定义窃听用户集合为 $\mathcal{L} \triangleq \{1, 2, \dots, E\}$ 。BS到RIS、BS到合法用户、BS到窃听用户的信道系数矩阵分别为 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N_b}$ 、 $\mathbf{H}_{BL} \in \mathbb{C}^{N_l \times N_b}$ 、 $\mathbf{H}_{B,e} \in \mathbb{C}^{N_e \times N_b}$, RIS到合法用户、RIS到窃听用户的信道系数矩阵分别为 $\mathbf{H}_{RL} \in \mathbb{C}^{M \times N_l}$ 、 $\mathbf{H}_{R,e} \in \mathbb{C}^{M \times N_e}$ 。 $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}(\mathbf{v})$ 为RIS的相移矩阵,其中 $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_M]$ 。 $v_m = e^{j\theta_m}$, $\theta_m \in [0, 2\pi)$,

$m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 表示RIS第 m 个反射单元相位系数。

因此,合法用户和第 e 个窃听用户收到的信号可表示为

$$\mathbf{y}_L = (\mathbf{H}_{BL}^H + \mathbf{H}_{RL}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}) \mathbf{x} + \mathbf{n}_L \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_e = (\mathbf{H}_{B,e}^H + \mathbf{H}_{R,e}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}) \mathbf{x} + \mathbf{n}_e, \forall e \in \mathcal{L} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ 是BS发送给合法用户的信息, $\mathbf{n}_L \in \mathbb{C}^{N_L \times 1}$, $\mathbf{n}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times 1}$ 是合法用户和第 e 个窃听用户接收机的噪声。接收噪声 \mathbf{n}_L 和 \mathbf{n}_e 是均值向量为 $\mathbf{0}$, 方差分别为 $\sigma_L^2 \mathbf{I}$ 、 $\sigma_e^2 \mathbf{I}$ 的圆对称高斯随机向量。则合法用户和第 e 个窃听用户的可达速率分别为

$$R_L = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_L^2} \mathbf{H}_L \mathbf{F} \mathbf{H}_L^H \right) \quad (3)$$

$$R_e = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e \mathbf{F} \mathbf{H}_e^H \right) \quad (4)$$

其中 $\bar{\mathbf{H}}_{B,e}$ 、 $\bar{\mathbf{H}}_{R,e}$ 表示信道估计值, $\Delta \mathbf{H}_{B,e}$ 、 $\Delta \mathbf{H}_{R,e}$ 表示估计误差, $\varepsilon_{B,e}$ 、 $\varepsilon_{R,e}$ 表示对应的误差上界^[20]。基于上述描述,保密速率最大化的鲁棒安全资源分配问题可以表述为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\Theta}} R_{\text{sec}} \\ & \text{s.t. C1: } \text{Tr}(\mathbf{F}) \leq P_{\text{max}} \\ & \quad \text{C2: } \mathbf{F} \succeq \mathbf{0} \\ & \quad \text{C3: } |v_m| = 1, m = 1, \dots, M \\ & \quad \text{C4: } \Delta \mathbf{H}_{B,e} \in \mathfrak{R}_{H_{B,e}}, \Delta \mathbf{H}_{R,e} \in \mathfrak{R}_{H_{R,e}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中C1表示BS最大发射功率约束,C2定义发射协方差矩阵为半正定矩阵,C3表示RIS的相移约束,C4表示窃听用户信道误差约束。在上述问题中 \mathbf{F} 和 $\boldsymbol{\Theta}$ 高度耦合,并且存在分式规划的问题,所以优化问题和约束条件相对于两个优化变量都是非凸的,无法直接求得最优解。但是约束条件C1、C2和约束条件C3是相互独立的,所以可采用交替优化算法通过交替迭代的形式优化每个独立的子问题,从而有效解决变量耦合问题。另外考虑到CSI不完美的情况下,问题中C4约束将会包含无穷多个非凸约束,而S-procedure方法可将无穷维的非凸约束转化为有限的线性矩阵不等式约束,使其可利用凸优化求解。

3 算法设计

为求解上述多变量耦合的具有无穷多非凸约束的非凸问题,首先采用交替优化分别优化求解 \mathbf{F} 和 $\boldsymbol{\Theta}$;其次利用Charnes-Cooper变换将目标函数中

其中, $\mathbf{F} = \mathbb{E}\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\}$ 表示发射协方差矩阵, $\mathbf{H}_L = \mathbf{H}_{BL}^H + \mathbf{H}_{RL}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}$, $\mathbf{H}_e = \mathbf{H}_{B,e}^H + \mathbf{H}_{R,e}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}$ 。

合法用户的保密速率可表示为

$$R_{\text{sec}} = \left[R_L - \max_{\forall e \in \mathcal{L}} R_e \right]^+ \quad (5)$$

其中 $[x]^+ = \max(0, x)$ 。

由于窃听用户不会主动与BS联系,且BS不知道窃听用户的具体位置,所以BS很难获得窃听信道的完整CSI。鉴于此,本文考虑BS到窃听用户以及RIS到窃听用户信道的不确定性,采用加性不确定性模型进行描述。实际信道增益被分为信道估计值和信道估计误差两个部分。同时基于最坏准则对不确定性进行建模,即假定信道估计误差位于一个限定范围内的有界不确定性集合内,则实际信道可表示为

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_{H_{B,e}} &= \left\{ \Delta \mathbf{H}_{B,e} | \mathbf{H}_{B,e} = \bar{\mathbf{H}}_{B,e} + \Delta \mathbf{H}_{B,e}, \|\Delta \mathbf{H}_{B,e}\|_F \leq \varepsilon_{B,e} \right\}, \forall e \in \mathcal{L} \\ \mathfrak{R}_{H_{R,e}} &= \left\{ \Delta \mathbf{H}_{R,e} | \mathbf{H}_{R,e} = \bar{\mathbf{H}}_{R,e} + \Delta \mathbf{H}_{R,e}, \|\Delta \mathbf{H}_{R,e}\|_F \leq \varepsilon_{R,e} \right\}, \forall e \in \mathcal{L} \end{aligned} \quad (6)$$

的分子分母解耦;接着通过S-Procedure方法将不完美CSI引入的无限维约束转换为有限凸约束式。最后为求解由单位模约束引入的秩一约束,采用了基于惩罚函数的凸差算法。

3.1 目标函数转换

为方便后续优化,可将目标函数重写为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\Theta}} R_{\text{sec}} &= \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\Theta}} \left(\max_{\forall e \in \mathcal{L}} R_e - R_L \right) = \\ & \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\Theta}} \log_2 \frac{\max_{\forall e \in \mathcal{L}} \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e \mathbf{F} \mathbf{H}_e^H \right)}{\det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_L^2} \mathbf{H}_L \mathbf{F} \mathbf{H}_L^H \right)} \Leftrightarrow \\ & \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\Theta}} \frac{\max_{\forall e \in \mathcal{L}} \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e \mathbf{F} \mathbf{H}_e^H \right)}{\det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_L^2} \mathbf{H}_L \mathbf{F} \mathbf{H}_L^H \right)} \end{aligned} \quad (8)$$

当 $\mathbf{A} \succeq \mathbf{0}$, 有 $\det(\mathbf{I} + \mathbf{A}) \geq 1 + \text{Tr}(\mathbf{A})$, 所以式(8)可转换为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\Theta}} \frac{\max_{\forall e \in \mathcal{L}} \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e \mathbf{F} \mathbf{H}_e^H \right)}{\det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_L^2} \mathbf{H}_L \mathbf{F} \mathbf{H}_L^H \right)} \Leftrightarrow \\ \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\Theta}} \frac{\max_{\forall e \in \mathcal{L}} \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e \mathbf{F} \mathbf{H}_e^H \right)}{1 + \frac{1}{\sigma_L^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_L \mathbf{F} \mathbf{H}_L^H)} \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 发射协方差矩阵优化

当RIS相移矩阵固定时,协方差矩阵优化子问题可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{F}} R_{\text{sec}} \\ & \text{s.t. C1: } \text{Tr}(\mathbf{F}) \leq P_{\text{max}} \\ & \quad \text{C2: } \mathbf{F} \geq 0 \\ & \quad \text{C4: } \Delta \mathbf{H}_{B,e} \in \mathfrak{R}_{H_{B,e}}, \Delta \mathbf{H}_{R,e} \in \mathfrak{R}_{H_{R,e}} \end{aligned} \quad (10)$$

引入辅助变量 $\tau', \zeta \geq 0$ 和 $\mathbf{Z} \geq 0$, 且 $\mathbf{Z} = \mathbf{F}\zeta$, 应用Charnes-Cooper变换将分子分母解耦, 可得

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{Z}, \zeta, \tau'} \tau' \\ & \text{s.t. } \overline{\text{C1}}: \text{Tr}(\mathbf{Z}) \leq \zeta P_{\text{max}} \\ & \quad \text{C4: } \Delta \mathbf{H}_{B,e} \in \mathfrak{R}_{H_{B,e}}, \Delta \mathbf{H}_{R,e} \in \mathfrak{R}_{H_{R,e}} \\ & \quad \text{C5: } \mathbf{Z} \geq 0, \zeta \geq 0 \\ & \quad \text{C6: } \max_{\forall e \in \mathcal{L}} \det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e(\mathbf{Z}/\zeta) \mathbf{H}_e^H\right) \leq \tau' \\ & \quad \text{C7: } 1 + \frac{1}{\sigma_L^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_L(\mathbf{Z}/\zeta) \mathbf{H}_L^H) \geq 1 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中的C6约束可转换为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{Z}, \zeta, \tau'} \tau' \Leftrightarrow \min_{\mathbf{Z}, \zeta, \tau'} \log_2(\tau') \\ & \quad \det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e(\mathbf{Z}/\zeta) \mathbf{H}_e^H\right) \leq \tau' \\ & \Leftrightarrow \log_2\left(\det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e(\mathbf{Z}/\zeta) \mathbf{H}_e^H\right)\right) \leq \log_2(\tau') \end{aligned} \quad (12)$$

通过一阶泰勒展开可得到C6约束中不等式左边部分式子的上界

$$\log_2\left(\det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e(\mathbf{Z}/\zeta) \mathbf{H}_e^H\right)\right) \leq a_e + \text{Tr}(\mathbf{A} \mathbf{H}_e \mathbf{Z} \mathbf{H}_e^H) / \sigma_e^2 \quad (13)$$

其中 $a_e = \log_2\left(\det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e(\tilde{\mathbf{Z}}/\zeta) \mathbf{H}_e^H\right)\right) - \text{Tr}(\mathbf{A} \mathbf{H}_e \tilde{\mathbf{Z}} \mathbf{H}_e^H) / \sigma_e^2$, $\mathbf{A} = \left(\zeta \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e \tilde{\mathbf{Z}} \mathbf{H}_e^H\right)^{-1}$.

为方便处理不完美CSI, 将C6约束写成如下形式

$$\text{C6} \Leftrightarrow a_e + \text{Tr}(\mathbf{A} \mathbf{H}^H \mathbf{S} \mathbf{H}) / \sigma_e^2 \leq \log_2 \tau' \quad (14)$$

其中 $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{Z} \mathbf{G}^H \boldsymbol{\Theta}^H \\ \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G} \mathbf{Z} & \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G} \mathbf{Z} \mathbf{G}^H \boldsymbol{\Theta}^H \end{bmatrix}$, $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{B,e} \\ \mathbf{H}_{R,e} \end{bmatrix}$.

根据迹运算等式 $\text{Tr}(\mathbf{C} \mathbf{B}^H \mathbf{A} \mathbf{B}) = \text{vec}^H(\mathbf{B})(\mathbf{C}^T \otimes \mathbf{A}) \text{vec}(\mathbf{B})$, 式(14)中C6约束可转化为如下形式

$$\mathbf{h}^H \mathbf{S}' \mathbf{h} + a_e - \tau \leq 0 \quad (15)$$

其中 $\mathbf{h} = \text{vec}(\mathbf{H})$, $\mathbf{S}' = \mathbf{A}^T \otimes (\mathbf{S} / \sigma_e^2)$, $\tau = \log_2 \tau'$. 带入信

道不确定性, 即 $\mathbf{H} = \bar{\mathbf{H}} + \Delta \mathbf{H}$, $\mathbf{h} = \bar{\mathbf{h}} + \Delta \mathbf{h}$, 则对上式(15)和问题式(11)中C4约束有

$$\begin{aligned} (15) & \Leftrightarrow \Delta \mathbf{h}^H \mathbf{S}' \Delta \mathbf{h} + 2 \text{Re}\{\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{S}' \Delta \mathbf{h}\} + \bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{S}' \bar{\mathbf{h}} + a_e - \tau \leq 0 \\ \text{C4} & \Leftrightarrow \Delta \mathbf{h}^H \Delta \mathbf{h} \leq \varepsilon_{B,e}^2 + \varepsilon_{R,e}^2 = \varepsilon^2 \end{aligned} \quad (16)$$

引理1^[21](S-Procedure) 定义 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$

$$f_i(x) = \mathbf{x}^H \mathbf{F}_i \mathbf{x} + 2 \text{Re}\{\mathbf{g}_i^H \mathbf{x}\} + h_i, i=1, 2 \quad (17)$$

其中 $\mathbf{F}_i \in \mathbf{S}^n$, $\mathbf{g}_i \in \mathbf{R}^n$, $h_i \in \mathbf{R}$. 则 $f_1(x) \leq 0 \Rightarrow f_2(x) \leq 0$ 成立当且仅当存在一个 λ 满足

$$\lambda \geq 0, \begin{bmatrix} \mathbf{F}_2 & \mathbf{g}_2 \\ \mathbf{g}_2^H & h_2 \end{bmatrix} \leq \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_1^H & h_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

基于引理1, 引入辅助变量 $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_e, \dots, \lambda_E]^T \geq 0$, 式(16)中两个式子可以等价转换为下列线性不等式:

$$\mathbf{\Gamma}_e = \begin{bmatrix} \lambda_e \mathbf{I}_e - \mathbf{S}' & -\mathbf{S}' \bar{\mathbf{h}} \\ -\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{S}' & -\lambda_e \varepsilon^2 - (a_e - \tau) - \bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{S}' \bar{\mathbf{h}} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (19)$$

至此, 优化问题式(11)被转化为:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{Z}, \zeta, \tau, \lambda} \tau \\ & \text{s.t. } \overline{\text{C1}}: \text{Tr}(\mathbf{Z}) \leq \zeta P_{\text{max}} \\ & \quad \text{C5: } \mathbf{Z} \geq 0, \zeta \geq 0 \\ & \quad \overline{\text{C6}}: \mathbf{\Gamma}_e \geq 0, \lambda_e \geq 0, \forall e \in \mathcal{L} \\ & \quad \text{C7: } \frac{1}{\sigma_L^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_L \mathbf{Z} \mathbf{H}_L^H) \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

问题式(20)可以通过使用基于内点法的CVX工具箱优化求解, 得到 \mathbf{Z}, ζ , 然后依据公式 $\mathbf{F} = \mathbf{Z} / \zeta$ 计算出发射协方差矩阵.

3.3 RIS相移矩阵优化

固定发射协方差矩阵, 关于 $\boldsymbol{\Theta}$ 的优化问题可表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\boldsymbol{\Theta}} \frac{\max_{\forall e \in \mathcal{L}} \det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{H}_e \mathbf{F} \mathbf{H}_e^H\right)}{1 + \frac{1}{\sigma_L^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_L \mathbf{F} \mathbf{H}_L^H)} \\ & \text{s.t. C3: } |\mathbf{v}_m| = 1, m=1, \dots, M \\ & \quad \text{C4: } \Delta \mathbf{H}_{B,e} \in \mathfrak{R}_{H_{B,e}}, \Delta \mathbf{H}_{R,e} \in \mathfrak{R}_{H_{R,e}} \end{aligned} \quad (21)$$

定义 $\mathbf{v}_1 = [\mathbf{v} \ 1]^H$, $\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1^H$, 则 $\text{rank}(\boldsymbol{\Phi}) = 1$, $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}(\boldsymbol{\Phi}_{(M+1, 1:M)})$. 同时对 $\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{G}^H$ 进行奇异值分解, 即 $\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{G}^H = \sum_j \mathbf{p}_j \mathbf{q}_j^H$, 可得到

$$\boldsymbol{\Theta} \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{G}^H \boldsymbol{\Theta}^H = \sum_j \mathbf{P} \boldsymbol{\Phi} \mathbf{Q} \quad (22)$$

其中 $\mathbf{P} = [\text{diag}(\mathbf{p}_j) \ 0]$, $\mathbf{Q} = [\text{diag}(\mathbf{q}_j^H) \ 0]^T$. 则有

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_e \mathbf{F} \mathbf{H}_e^H &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{B,e}^H & \mathbf{H}_{R,e}^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{F} \mathbf{G}^H \text{diag}^H(\Phi_{(M+1,1:M)}) \\ \text{diag}(\Phi_{(M+1,1:M)}) \mathbf{G} \mathbf{F} & \sum_j \mathbf{P} \Phi \mathbf{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{B,e} \\ \mathbf{H}_{R,e} \end{bmatrix} = \mathbf{H}^H \mathbf{R} \mathbf{H} \\
 \mathbf{H}_L \mathbf{F} \mathbf{H}_L^H &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{BL}^H & \mathbf{H}_{RL}^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{F} \mathbf{G}^H \text{diag}^H(\Phi_{(M+1,1:M)}) \\ \text{diag}(\Phi_{(M+1,1:M)}) \mathbf{G} \mathbf{F} & \sum_j \mathbf{P} \Phi \mathbf{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{BL} \\ \mathbf{H}_{RL} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_1^H \mathbf{R} \mathbf{H}_1 \quad (23)
 \end{aligned}$$

引入辅助变量 $\gamma', \eta \geq 0$ 和 $\mathbf{U} \geq 0$, 且 $\mathbf{U} = \Phi \eta$, 应用 Charnes-Cooper 变换将分子分母解耦, 可得

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{U}, \eta, \gamma'} & \gamma' \\
 \text{s.t. } & \overline{\text{C3}}: |\mathbf{U}_{(m,m)}| = \eta, m = 1, \dots, M \\
 & \text{C4}: \Delta \mathbf{H}_{B,e} \in \mathfrak{R}_{H_{B,e}}, \Delta \mathbf{H}_{R,e} \in \mathfrak{R}_{H_{R,e}} \\
 & \overline{\text{C5}}: \mathbf{U} \geq 0, \eta \geq 0 \\
 & \text{C8}: \text{rank}(\mathbf{U}) = 1 \\
 & \text{C9}: \det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\eta \sigma_e^2} \mathbf{H}^H \mathbf{R}_1 \mathbf{H}\right) \leq \gamma', \forall e \in \mathcal{L} \\
 & \text{C10}: 1 + \frac{1}{\eta \sigma_L^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_1^H \mathbf{R}_1 \mathbf{H}_1) \geq 1 \quad (24)
 \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \eta \mathbf{F} & \mathbf{F} \mathbf{G}^H \text{diag}^H(\mathbf{U}_{(M+1,1:M)}) \\ \text{diag}(\mathbf{U}_{(M+1,1:M)}) \mathbf{G} \mathbf{F} & \sum_j \mathbf{P} \mathbf{U} \mathbf{Q} \end{bmatrix}$.

同发射协方差矩阵优化中的 C6 约束, 式 (24) 中的 C9 约束可转换为

$$\begin{aligned}
 \text{C9} &\Leftrightarrow \log_2\left(\det\left(\mathbf{I} + \frac{1}{\eta \sigma_e^2} \mathbf{H}^H \mathbf{R}_1 \mathbf{H}\right)\right) \leq \log_2 \gamma' \\
 &\Leftrightarrow b_e + \text{Tr}(\mathbf{B} \mathbf{H}^H \mathbf{R}_1 \mathbf{H}) / \sigma_e^2 \leq \log_2 \gamma' \\
 &\Leftrightarrow \mathbf{h}^H \mathbf{R}' \mathbf{h} + b_e - \gamma \leq 0 \quad (25)
 \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{h} = \text{vec}(\mathbf{H})$, $\mathbf{R}' = \mathbf{B}^T \otimes \mathbf{R}_1 / \sigma_e^2$, $\gamma = \log_2 \gamma'$, $b_e = \log_2\left(\det\left(\mathbf{I} + \left(\mathbf{H}^H \widetilde{\mathbf{R}}_1 \mathbf{H}\right) / \eta \sigma_e^2\right)\right) - \text{Tr}\left(\mathbf{B} \mathbf{H}^H \widetilde{\mathbf{R}}_1 \mathbf{H}\right) / \sigma_e^2$, $\mathbf{B} = \left(\eta \mathbf{I} + \left(\mathbf{H}^H \widetilde{\mathbf{R}}_1 \mathbf{H}\right) / \sigma_e^2\right)^{-1}$. 带入信道不确定性, 即 $\mathbf{H} = \overline{\mathbf{H}} + \Delta \mathbf{H}$, $\mathbf{h} = \overline{\mathbf{h}} + \Delta \mathbf{h}$, 则对上式 (25) 和问题式 (24) 中的 C4 约束有

$$\begin{aligned}
 \text{C4} &\Leftrightarrow \Delta \mathbf{h}^H \Delta \mathbf{h} \leq \varepsilon_{B,e}^2 + \varepsilon_{R,e}^2 = \varepsilon^2 \\
 \text{C9} &\Leftrightarrow \Delta \mathbf{h}^H \mathbf{R}' \Delta \mathbf{h} + 2 \text{Re}\left\{\overline{\mathbf{h}}^H \mathbf{R}' \Delta \mathbf{h}\right\} + \overline{\mathbf{h}}^H \mathbf{R}' \overline{\mathbf{h}} + b_e - \gamma \leq 0 \quad (26)
 \end{aligned}$$

基于引理 1, 引入辅助变量 $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \dots, \mu_e, \dots, \mu_E]^T \geq 0$, 式 (25) 中两个式子可以等价转换为下列线性不等式:

$$\mathbf{G}'_e = \begin{bmatrix} \mu_e \mathbf{I}_{N_e} - \mathbf{R}' & -\mathbf{R}' \overline{\mathbf{h}} \\ -\overline{\mathbf{h}}^H \mathbf{R}' & -\mu_e \varepsilon^2 - (b_e - \gamma) - \overline{\mathbf{h}}^H \mathbf{R}' \overline{\mathbf{h}} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (27)$$

至此, 优化问题式 (22) 被转化为

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{U}, \eta, \gamma, \boldsymbol{\mu}} & \gamma \\
 \text{s.t. } & \overline{\text{C3}}: |\mathbf{U}_{(m,m)}| = \eta, m = 1, \dots, M \\
 & \overline{\text{C5}}: \mathbf{U} \geq 0, \eta \geq 0 \\
 & \text{C8}: \text{rank}(\mathbf{U}) = 1 \\
 & \overline{\text{C9}}: \mathbf{G}'_e \geq 0, \mu_e \geq 0, \forall e \in \mathcal{L} \\
 & \text{C10}: 1 + \frac{1}{\eta \sigma_L^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_1^H \mathbf{R}_1 \mathbf{H}_1) \geq 1 \quad (28)
 \end{aligned}$$

由于非凸约束式 C8, 上述问题无法直接求解, 可将 C8 等价为一个凸差函数约束求解, 即

$$\text{C8}: \text{rank}(\mathbf{U}) = 1 \Leftrightarrow \text{Tr}(\mathbf{U}) - \|\mathbf{U}\|_2 \leq 0 \quad (29)$$

其中 $\text{Tr}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N \sigma_i(\mathbf{X})$, $\|\mathbf{U}\|_2 = \sigma_1(\mathbf{X})$, $\sigma_i(\mathbf{X})$ 是 \mathbf{X} 的奇异值。非凸部分 $\|\mathbf{U}\|_2$ 可松弛为凸性表达式: $\text{Tr}[\lambda_{\max}(\mathbf{U}^{(n)}) \lambda_{\max}^H(\mathbf{U}^{(n)}) (\mathbf{U} - \mathbf{U}^{(n)})] + \|\mathbf{U}^{(n)}\|_2$, 随后将凸差函数作为一个惩罚组件添加到目标函数中并去除无关项, 则问题式 (28) 可重新表述为

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{U}, \eta, \gamma, \boldsymbol{\mu}} & \gamma + \rho \left(\text{Tr}(\mathbf{U}) - \text{Tr}(\lambda_{\max}(\mathbf{U}^{(n)}) \lambda_{\max}^H(\mathbf{U}^{(n)}) \mathbf{U}) \right) \\
 \text{s.t. } & \overline{\text{C3}}: |\mathbf{U}_{(m,m)}| = \eta, m = 1, \dots, M \\
 & \overline{\text{C5}}: \mathbf{U} \geq 0, \eta \geq 0 \\
 & \overline{\text{C9}}: \mathbf{G}'_e \geq 0, \lambda_e \geq 0, \forall e \in \mathcal{L} \\
 & \text{C10}: 1 + \frac{1}{\eta \sigma_L^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_1^H \mathbf{R}_1 \mathbf{H}_1) \geq 1 \quad (30)
 \end{aligned}$$

问题式 (30) 可以通过使用基于内点法的 CVX 工具箱优化求解, 得到 \mathbf{U}, η , 然后依据公式 $\Phi = \mathbf{U} / \eta$, $\Theta = \text{diag}(\Phi_{(M+1,1:M)})$ 计算出 RIS 相移矩阵。

4 性能分析

4.1 收敛性分析

在迭代求解过程中, 由于每次迭代中子问题的目标函数都是最大化保密速率, 因此可以确保在整个过程中保密速率是非递减的。将优化问题的目标函数表示为 $F(\mathbf{F}, \mathbf{v})$, 可以得出

$$F(\mathbf{F}^{(n+1)}, \mathbf{v}^{(n+1)}) \stackrel{b}{\geq} F(\mathbf{F}^{(n+1)}, \mathbf{v}^{(n)}) \stackrel{a}{\geq} F(\mathbf{F}^{(n)}, \mathbf{v}^{(n)}) \quad (31)$$

给定初始值后, a 过程通过求解问题式 (20) 实现并求出全局最优解 $\mathbf{F}^{(n+1)}$, b 过程通过求解问题式 (30) 实现并求出全局最优解 $\mathbf{v}^{(n+1)}$ 。同时因为发射

功率约束的存在, $F(\mathbf{F}, \mathbf{v})$ 不能无限增大^[22]。故本文采用的交替优化算法最终会收敛。具体算法如表1所示。

表1 基于有界信道不确定性模型的鲁棒保密速率
最大化算法

Tab. 1 Robust secrecy rate maximization algorithm based on bounded error models

初始化功率、天线数、信道系数、信道误差上界, 设置最大迭代次数和收敛精度

- (1) for iter = 1, 2, ..., iter_max;
- (2) 求解问题式(20), 并进一步算出发射协方差矩阵;
- (3) 求解问题式(30), 并进一步算出RIS相移矩阵;
- (4) 带入优化得到的发射协方差矩阵和相移矩阵, 计算保密速率;
- (5) if $|R_{\text{sec}}^{\text{iter}} - R_{\text{sec}}^{\text{iter}-1}| / R_{\text{sec}}^{\text{iter}} \leq \vartheta$
break;
- else
iter = iter + 1;
- end
- (6) end

4.2 复杂度分析

本文中优化算法的复杂度主要由求解发射协方差矩阵和RIS相移矩阵两部分构成, 即问题式(20)和(30)这两个子优化问题。两者都是半正定规划问题, 根据文献[21]所给的半正定规划问题计算复杂度的一般表达式可以得出内点法求解问题式(20)每次AO迭代的计算复杂度为

$$o_F = \mathcal{O}((E((N_B + M)N_E + 1))^{1/2} \cdot N_B^2 (N_B^4 + N_B^2 E((N_B + M)N_E + 1)^2 + E((N_B + M)N_E + 1)^3)) \quad (32)$$

内点法求解问题式(32)每次AO迭代的计算复杂度为

$$o_\theta = \mathcal{O}((E((N_B + M)N_E + 1) + 2M)^{1/2} \cdot M(M^2 + ME((N_B + M)N_E + 1)^2 + E((N_B + M)N_E + 1)^3) + M^2) \quad (33)$$

因此求解问题式(7)时每次迭代的复杂度为 $o_F + o_\theta$ 。

5 仿真分析

在本节中, 将对所提模型和算法进行仿真验证和性能评估。图2给出了系统三维坐标图, BS位于(0, 0, 0), RIS位于(15, 10, 5), 合法用户位于(30, 0, 0), 窃听用户随机分布在以半径5 m的圆形区域内, 圆心为合法用户坐标。

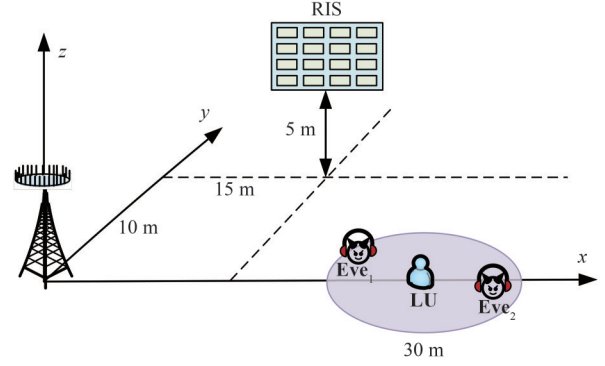


图2 仿真场景

Fig. 2 Simulation scene

信道大尺度衰落路径损耗模型为 $\beta = \beta_0 (d/d_0)^{-\alpha}$, 其中 β_0 为参考距离 d_0 的路径损耗, d 是实际信道距离, α 是路径衰落指数。在仿真中设置 $\beta_0 = -30$ dB, $d_0 = 1$, $\alpha_{BL} = 3.5$, $\alpha_{BR} = \alpha_{RE} = 2.2$ ^[23]。BS到用户的信道建模为瑞利衰落, BS到RIS到用户的信道建模为莱斯衰落。莱斯信道模型^[24]为

$$\mathbf{H} = \sqrt{\beta} \left(\sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} \overline{\mathbf{H}} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} \tilde{\mathbf{H}} \right) \quad (34)$$

其中 κ 是莱斯因子, 在仿真中设置 $\kappa = 1$; $\overline{\mathbf{H}}$ 是视距分量, 由发射机和接收机的转向向量的乘积定义; $\tilde{\mathbf{H}}$ 是非视距分量, 由瑞利衰落计算得到。CSI误差上界被定义为 $\varepsilon_{B,e} = \delta_1 \|\overline{\mathbf{H}}_{B,e}\|_F$, $\varepsilon_{R,e} = \delta_2 \|\overline{\mathbf{H}}_{R,e}\|_F$, $\forall e \in \mathcal{L}$, 其中 $\delta_i \in [0, 1]$, $i = 1, 2$ 为信道不确定性比率^[25]。其他重要参数如表2所示。

图3给出了随交替优化迭代次数合法用户保密速率收敛图。从中可以看出, 不同参数设置下本文算法都可以很快达到收敛, 且合法用户保密速率得

表2 仿真参数设置

Tab. 2 Simulation Parameter Setting

仿真参数名称	仿真参数值
基站发射天线数	8
RIS反射单元数	8
合法用户接收天线数	4
窃听用户接收天线数	4
窃听用户个数	2
基站最大发射功率	10 mW
噪声功率	-90 dBm
仿真最大迭代数	100
收敛精度	0.001
信道不确定性比率	0.01

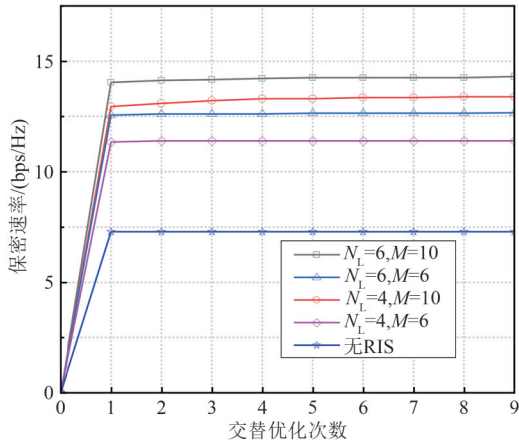


图3 保密速率收敛图

Fig. 3 Secrecy rate convergence diagram

到大幅提升,说明本文算法能有效提升系统性能,并使其逐渐趋向稳定值。另外,随着合法用户天线数或者反射单元数的增加,合法用户保密速率都增大。因为接收天线数量的增加会带来更大的空间分集增益,而增加反射单元数会增加反射分量,都会增大合法用户速率。

图4给出了合法用户保密速率与RIS反射元件数量的关系。从中可以看出,随着RIS反射单元数目的增加,合法用户保密速率逐渐增大。这是因为反射单元数目增加意味着可以反射更多来自基站的信号,再通过调整相移能尽可能增强合法用户接收到的反射信号,减弱窃听用户接收到的反射信号,从而提高系统的保密性能。RIS随机相位时保密速率也可能与反射单元数目成正比,但相比本文算法其对性能的提升较小。无RIS的情况保密性能

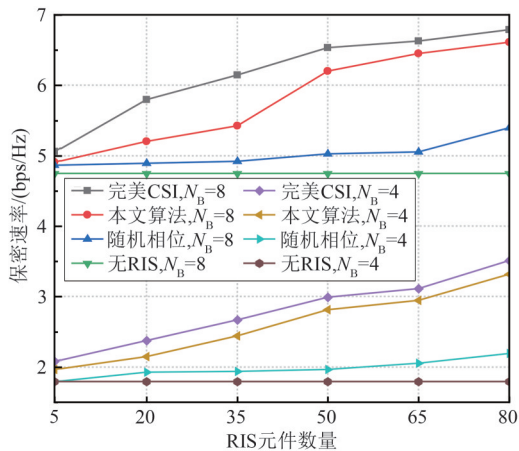


图4 保密速率与RIS反射元件数量的关系

Fig. 4 Secrecy rate versus number of RIS reflective elements

最差且保持不变。这表明通过部署具有一定数量反射单元的RIS可以有效抑制窃听,保证合法用户的安全通信。

图5给出了合法用户保密速率与发射功率的关系。从中可以看出,在RIS反射元件数量相同的情况下,无论哪种算法合法用户保密速率都随最大发射功率的增加而增大,最后当最大发射功率达到某个阈值后,合法用户的保密速率将趋于稳定。在相同的最大发射功率下,本文算法的合法用户保密速率随M的增加而增大,且明显优于RIS随机相位和无RIS两种基准方案。

图6给出了合法用户保密速率与窃听用户数量的关系。从中可以看出,合法用户保密速率随窃听用户数量增加而减小。这是因为随着窃听用户数量的

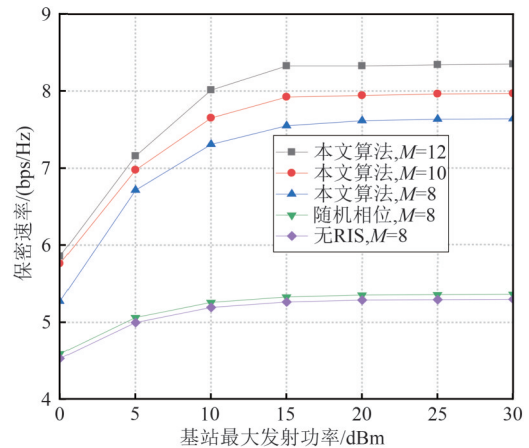


图5 保密速率与发射功率的关系

Fig. 5 Secrecy rate versus maximum transmit power of the BS

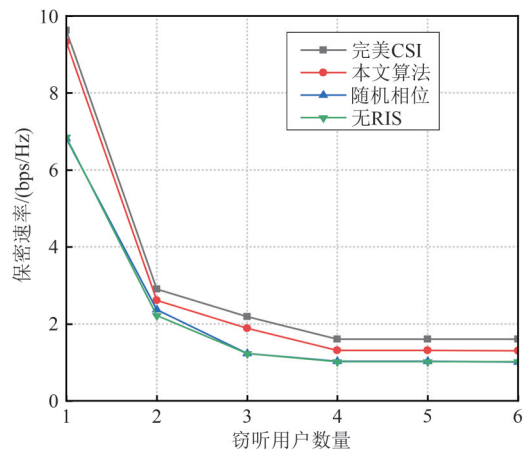


图6 保密速率与窃听用户数量的关系

Fig. 6 Secrecy rate versus the number of eavesdropping users

增加,为了降低窃听信道的质量,多天线系统需要分配更多的空间自由度。这导致了传输合法信息的资源被占用,进而降低了合法用户接收到的信号质量,使得合法用户的保密速率减小。但相比于随机相位和无RIS两种基准方案,本文算法保密性能明显更优,接近完美CSI方案,验证了本文算法的有效性。

图7给出了合法用户保密速率随窃听信道不确定性比率的变化关系图。从中可以看出,窃听用户CSI不完美时不同算法的保密速率随信道不确定性的比率增加而减小。因为信道不确定性的比率增加意味着实际通信信道与算法设计时考虑的信道之间区别越大,从而资源分配方案产生误差。但本文算法相比随机相位的情况保密速率更高,下降的幅度也更小,这是因为本文算法提前考虑了信道误差的影响,可以降低其对系统性能的影响。

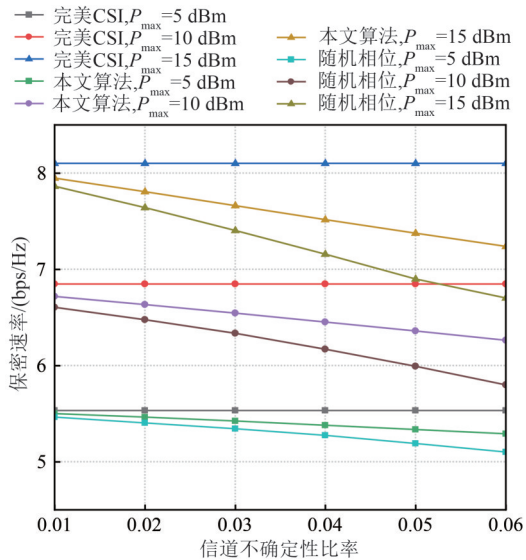


图7 保密速率与窃听用户信道不确定性比率的关系
Fig. 7 Secrecy rate versus eavesdropping user channel uncertainty ratio

图8给出了合法用户保密速率与合法用户天线数量的关系。从中可以看出,合法用户保密速率与合法用户天线数量成正比。当合法用户天线数量相同时,合法用户保密速率随窃听用户的天线数量增加而减小。这是因为用户接收天线数量的增加会给用户带来更大的空间分集增益,从而增加用户速率影响保密速率。在合法用户和窃听用户天线数量均相同的情况下,本文算法的保密性能优于随机相位的方案和无RIS的方案。

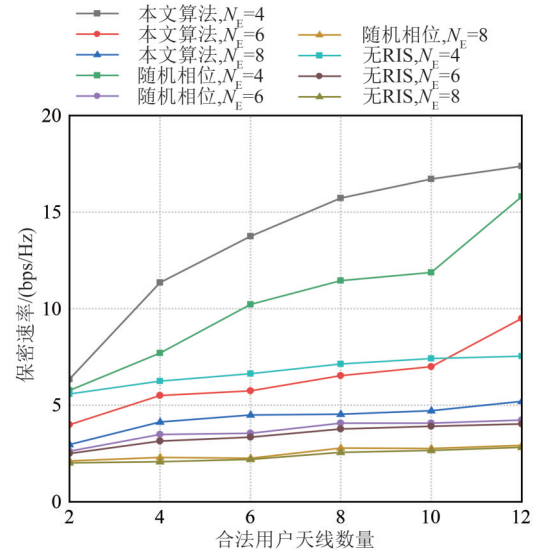


图8 保密速率与合法用户天线数量的关系
Fig. 8 Secrecy rate versus the number of antennas for legitimate users

6 结论

为了提高RIS辅助的MIMO系统在面对信道不确定性和保护用户信息免受泄露方面的能力,本文在存在多个窃听用户的背景下,考虑了合法用户完美CSI而窃听用户不完美CSI的场景,基于有界信道不确定性模型,提出了一种资源分配算法。在满足基站最大发射功率和RIS相移的前提下,联合优化了基站天线的功率分配与RIS的无源波束成形,以最大化合法用户的保密速率。采用了交替优化的策略,分别针对发射协方差矩阵和RIS相移进行优化。在优化过程中,运用了Charnes-Cooper变换、S-Procedure方法和基于惩罚函数的凸差算法将子优化问题转化为凸问题求解。通过仿真验证,本算法不仅具备良好的收敛性,还展现出较高的安全性和强大的鲁棒性。需要指出的是,本文只考虑了单个合法用户的情况,且窃听用户之间并没有合作。在将来的研究中,可考虑多合法用户或者多个窃听用户合作的应用场景,进一步优化,以提升安全性能。此外,本文采用的凸优化算法虽然能保证更优的系统性能但存在计算复杂度较高的问题,后续可考虑结合深度强化学习等方法求解,在不明显降低优化性能的情况下获得更低的计算复杂度。

参考文献

- [1] LI Guoquan, HONG Zijie, PANG Yu, et al. Resource

- allocation for sum-rate maximization in NOMA-based generalized spatial modulation[J]. *Digital Communications and Networks*, 2022, 8(6): 1077-1084.
- [2] HAN Hui, CAO Yang, SHENG Min, et al. IRS-aided secure NOMA networks against internal and external eavesdropping[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(11): 7536-7548.
- [3] JUNG D H, RYU J G, CHOI J. When satellites work as eavesdroppers[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2022, 17: 2784-2799.
- [4] 张祖凡, 唐睿. IRS多分区辅助太赫兹多子阵列波束成形设计[J]. *通信学报*, 2023, 44(8): 78-88.
ZHANG Zufan, TANG Rui. Design of beamforming for IRS multi-partition-aided THz multi-subarray[J]. *Journal on Communications*, 2023, 44(8): 78-88. (in Chinese)
- [5] 韩帅, 王金明, 孟维晓, 等. 窃听CSI未知场景下基于可重构智能表面的物理层安全传输方案[J]. *信号处理*, 2022, 38(9): 1872-1880.
HAN Shuai, WANG Jinming, MENG Weixiao, et al. A physical layer security transmission scheme based on reconfigurable intelligent surfaces for eavesdropping CSI unknown scenarios[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(9): 1872-1880. (in Chinese)
- [6] KAUR R, BANSAL B, MAJHI S, et al. A survey on reconfigurable intelligent surface for physical layer security of next-generation wireless communications[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2024, 5: 172-199.
- [7] 卢汉成, 王亚正, 赵丹, 等. 智能反射表面辅助的无线通信系统的物理层安全综述[J]. *通信学报*, 2022, 43(2): 171-184.
LU Hancheng, WANG Yazheng, ZHAO Dan, et al. Survey of physical layer security of intelligent reflecting surface-assisted wireless communication systems[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(2): 171-184. (in Chinese)
- [8] FENG Keming, LI Xiao, HAN Yu, et al. Physical layer security enhancement exploiting intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(3): 734-738.
- [9] MUKHERJEE A, KUMAR V, TRAN L N. Secrecy rate maximization for intelligent reflecting surface assisted MIMOME wiretap channels[C]//MILCOM 2021 - 2021 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). San Diego, CA, USA. IEEE, 2021: 261-266.
- [10] JIANG Weiheng, CHEN Bolin, GARG S, et al. Joint transmit precoding and reflect beamforming for IRS-assisted MIMO-OFDM secure communications[C]//2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Madrid, Spain. IEEE, 2021: 1-6.
- [11] SHI Weiping, WU Qingqing, XIAO Fu, et al. Secrecy throughput maximization for IRS-aided MIMO wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(11): 7520-7535.
- [12] CAO Yurui, XU Sai, LIU Jiajia, et al. IRS backscatter enhancing against jamming and eavesdropping attacks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(12): 10740-10751.
- [13] ALEXANDROPOULOS G C, KATSANOS K, WEN Miaowen, et al. Safeguarding MIMO communications with reconfigurable metasurfaces and artificial noise[C]//ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Montreal, QC, Canada. IEEE, 2021: 1-6.
- [14] QI Yue, VAEZI M. IRS-assisted physical layer security in MIMO-NOMA networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(3): 792-796.
- [15] LI Guoquan, ZHANG Hui, WANG Yuhui, et al. QoS guaranteed power minimization and beamforming for IRS-assisted NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(3): 391-395.
- [16] 李国权, 党刚, 林金朝, 等. RIS辅助的MISO系统安全鲁棒波束赋形算法[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(8): 2867-2875.
LI Guoquan, DANG Gang, LIN Jinzhao, et al. Secure and robust beamforming algorithm for RIS assisted MISO systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(8): 2867-2875. (in Chinese)
- [17] ZHU Guangyu, MU Xidong, GUO Li, et al. Robust resource allocation for STAR-RIS assisted SWIPT systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(6): 5616-5631.
- [18] ALEXANDROPOULOS G C, KATSANOS K D, WEN Miaowen, et al. Counteracting eavesdropper attacks through reconfigurable intelligent surfaces: A new threat model and secrecy rate optimization[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2023, 4: 1285-1302.
- [19] DONG Limeng, WANG Huiming. Enhancing secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(11): 7543-7556.
- [20] 徐勇军, 徐然, 周继华, 等. 面向窃听用户的RIS-MISO系统鲁棒资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(7): 2253-2263.
XU Yongjun, XU Ran, ZHOU Jihua, et al. Robust resource allocation algorithm for RIS-assisted MISO systems with eavesdroppers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(7): 2253-2263. (in Chinese)
- [21] 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.

- [22] YOU Li, XIONG Jiayuan, HUANG Yufei, et al. Reconfigurable intelligent surfaces-assisted multiuser MIMO uplink transmission with partial CSI[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 5613-5627.
- [23] HUA Meng, WU Qingqing, NG D W K, et al. Intelligent reflecting surface-aided joint processing coordinated multipoint transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(3): 1650-1665.
- [24] BAI Jiale, WANG Huiming, LIU Peng. Robust IRS-aided secrecy transmission with location optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(9): 6149-6163.
- [25] ZHANG Zijian, DAI Linglong. A joint precoding framework for wideband reconfigurable intelligent surface-aided cell-free network[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 4085-4101.

作者简介



李国权 男, 1980年生, 河南方城人。重庆邮电大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线资源管理、智能反射面优化等。
E-mail: ligq@cqupt.edu.cn



刘婷 女, 2000年生, 重庆云阳人。重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为无线资源管理、智能反射面优化等。
E-mail: liut1642@163.com



刘梦洁 女, 2002年生, 河南南阳人。重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为无线资源管理、智能反射面优化等。
E-mail: 1154202052@qq.com



庞宇 男, 1978年生, 四川成都人。重庆邮电大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为集成电路设计、无线通信和人工智能等。
E-mail: pangyu@cqupt.edu.cn



林金朝 男, 1966年生, 四川蓬溪人。重庆邮电大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线传输技术、BAN网络与信道处理技术等。
E-mail: linjz@cqupt.edu.cn

(责任编辑: 刘建新)