超大规模RIS辅助近场安全通信的波束成形优化

徐晓彤、张倩、李云霄、程学军、刘美慧和刘菊

arXiv:2603.05922v1 [cs.IT] 6 Mar 2026

摘要——本文研究一种由超大规模可重构智能表面（XL-RIS）辅助的近场物理层安全（PLS）通信系统，旨在通过联合优化基站处的预编码向量和XL-RIS处的反射系数矩阵来最大化保密速率。本文引入人工干扰以进一步增强通信安全性。为解决非凸保密速率问题，采用基于交替优化的算法将其分解为两个子问题。具体而言，在优化基站处的发射波束成形器时，通过加权最小均方误差算法和基于逐次凸近似的算法，将非凸问题转化为凸问题。对于XL-RIS相移矩阵的优化问题，则采用一种低复杂度的、基于交替方向乘子法的算法，以提高设计的灵活性。所提出的算法能够支持XL-RIS的离散相位优化，从而更好地满足实际系统需求。仿真结果表明，当窃听者与合法用户位于同一方向且距XL-RIS更近时，本文提出的方案仍能确保安全通信。

索引词——柔性智能超表面（FIM）、通感一体化（ISAC）、平均 Cram´er-Rao 界、波束成形优化、表面形状优化。

I. 引言

由于无线通信具有广播特性，因此容易发生信息泄露。作为一项颇具前景的 6G 技术，可重构智能表面（RIS）有望提升整体通信质量 [1]–[3]。

应用于物理层安全（PLS）时，RIS 通过被动波束成形增强合法用户处的目标信号功率，同时抑制窃听者处的信号功率，从而实现安全且节能的传输 [4], [5]。然而，RIS 的性能受双重衰落效应限制。鉴于 RIS 的阵列增益随反射单元数量呈平方增长 [6]，，采用大量低成本反射单元可以缓解这种性能退化。超大规模可重构智能表面（XL-RIS）的概念由此被提出 [7], [8]。随着 RIS 孔径增大，通信趋于发生在近场区域。

张倩现就职于中国青岛 266237 的山东大学信息科学与工程学院，同时也就职于新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院。

徐晓彤、李云霄、程学军、刘美慧和刘菊均供职于中国青岛266237的山东大学信息科学与工程学院。

与远场平面波模型不同，近场球面波模型采用精确的电磁波传播模型，同时考虑角度和径向信息 [5], [9]。 [9] 的作者证明，在近场场景中，合法用户与非法用户实现角度对准时，波束聚焦能够实现安全通信。 [10] 的作者研究发现，与远场设置相比，超大规模可重构智能表面辅助的近场隐蔽通信能够实现更高的隐蔽性。为增强安全传输，研究人员提出了多种物理层安全技术，例如人工干扰 [11], 波束成形 [5], 和协作中继 [12]。

然而，关于超大规模可重构智能表面（XL-RIS）赋能的近场通信中物理层安全（PLS）的研究仍然有限。本文旨在填补这一空白，研究超大规模可重构智能表面辅助近场安全通信中的联合波束成形与相移矩阵优化。具体而言，我们在基站发射功率、服务质量（QoS）、串行干扰消除（SIC）以及超大规模可重构智能表面反射单元恒模等约束下，构建了保密速率最大化问题。为解决该非凸问题，我们提出一种基于交替优化（AO）的算法。在波束成形器设计方面，提出一种基于加权最小均方误差（WMMSE）的算法。在超大规模可重构智能表面反射系数矩阵设计方面，则采用一种低复杂度的基于交替方向乘子法（ADMM）的算法。考虑到实际硬件因素，我们引入一种基于线搜索的离散相移优化方案，使所提出的设计更适用于实际部署。仿真结果表明，与基准方案相比，所提出的方案能够提升保密性能。

符号说明：$(\cdot)^*$、$(\cdot)^{\mathrm{T}}$ 和$(\cdot)^{\mathrm{H}}$ 分别表示共轭、转置和共轭转置运算，以及矩阵求逆运算。C和R分别表示复数空间和实数空间。 $\mathcal{CN}(\cdot,\cdot)$表示圆对称复高斯分布。 $\mathcal{R}\{\cdot\}$ 和 $\mathcal{I}\{\cdot\}$ 分别表示实部和虚部。vec(·)和Tr $\{\cdot\}$ 分别表示矩阵的向量化和迹。 j表示虚数单位。 $\mathbf{1}_N$ 是一个含有 N个元素的全一向量。$\mathbf{I}_K$ 表示 $K\times K$ 单位矩阵。 $[\boldsymbol{z}]_n$ 表示向量 $\boldsymbol{z}$ 的第n个元素。 $\|\cdot\|_*$、 $\|\cdot\|_2$和 $|\cdot|$ 分别表示不明确的范数、欧几里得范数和绝对值。 $\Pi_{\mathcal{C}}$表示投影运算。

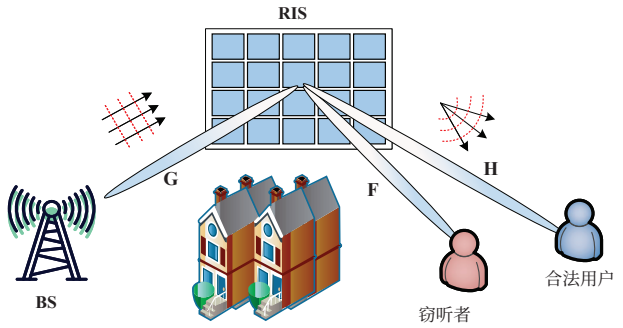


图1. 超大规模可重构智能表面辅助的下行安全通信系统模型。

II. 系统模型

本节考虑一个由超大规模可重构智能表面辅助的下行多输入单输出（MISO）安全通信系统，如图1所示。基站（BS）配备 M 根天线。超大规模可重构智能表面是一个包含 $N = N_1 \times N_2$ 个反射单元的均匀平面阵列（UPA）。由于遮挡，假设合法用户和窃听者与基站之间均不存在直达链路。超大规模可重构智能表面的相移矩阵表示为 $\boldsymbol{\Theta} = \mathrm{diag}\left(e^{j\theta_1}, \ldots\ldots, e^{j\theta_N}\right)$，其中 $\theta_n \in [-\pi, \pi)$。远场区域与近场区域之间的边界由瑞利距离 $d = 2D^2/\lambda$ 定义，其中 D 为天线孔径，λ 为载波波长。考虑到实际部署需求 [13], ，假设超大规模可重构智能表面更靠近用户一侧，以最大化性能。因此，基站位于超大规模可重构智能表面的远场区域，而接收端位于其近场区域。

我们假设，合法用户的信道状态信息可通过基站 [14] 发送的下行导频信号获得。此外，假设基站能够获取窃听者的信道状态信息：i）当窃听者伪装成合法用户时，由于合法交互，基站可以获得该信道状态信息。ii）当窃听者怀有恶意时，通常使用辐射计监测基站与用户之间的通信。在实践中，几乎所有辐射计都是超外差接收机，其信号泄漏不可避免。

基站与超大规模可重构智能表面之间的远场信道 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N\times M}$ 可建模为

$$\mathbf{G} = \sum_{i=1}^{L_1} \alpha_i \boldsymbol{b}(\varphi_i, \eta_i)\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\gamma_i), \tag{1}$$

其中，L_1 表示传播路径的数量，α_i 表示第 i 条路径的复增益。基站和超大规模可重构智能表面的阵列响应向量分别为

$$\boldsymbol{a}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{M}}\left[e^{j\frac{2\pi d}{\lambda}m\sin\psi}\right]^{\mathrm{T}}_{m\in L(M)}, \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{b}(\varphi,\eta) =& \frac{1}{\sqrt{N}}\left[e^{j\frac{2\pi d}{\lambda}n_1\sin\varphi\cos\eta}\right]^{\mathrm{T}}_{n_1\in L(N_1)} \\ &\otimes \left[e^{j\frac{2\pi d}{\lambda}n_2\sin\eta}\right]^{\mathrm{T}}_{n_2\in L(N_2)},\end{aligned} \tag{3}$$

其中，$L(n) = \{0, 1, \ldots, n-1\}$ 是索引集。d 是天线间距。ψ 是基站方位角。φ 和 η 表示超大规模可重构智能表面的方位角和俯仰角。

超大规模可重构智能表面与接收机之间的近场信道采用球面波模型。我们以超大规模可重构智能表面与合法用户之间的信道 $\boldsymbol{h}$ 为例。

$$\boldsymbol{h} = \beta_1 \boldsymbol{b}(\boldsymbol{r}_{re}), \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{h} \in \mathbb{C}^{N\times 1}$，$\beta_1$ 为信道增益。导向矢量 $\boldsymbol{b}(\boldsymbol{r}_{re})$ 可由式（5）给出，其中 $D_{\mathrm{re}}(n_1, n_2)$ 为超大规模可重构智能表面第 n_1、n_2 个单元与用户之间的距离。

为保证安全传输，我们假设基站在发送信号的同时生成人工干扰。发射信号可表示为 $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{w}s + \boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}z$，其中 $\boldsymbol{w} \in \mathbb{C}^{M\times 1}$ 和 $\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}} \in \mathbb{C}^{M\times 1}$ 分别表示预编码向量和人工干扰向量。$s \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 为基站发送的数据符号。$z \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 为干扰信号。接收信号可表示为

$$y = \boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x} + n, \quad y_e = \boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x} + n_e, \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}} = \boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Theta}\mathbf{G}$；$\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}} = \boldsymbol{f}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Theta}\mathbf{G}$；$n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 和 $n_e \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_e^2)$ 表示加性高斯白噪声（AWGN）。为减轻人工干扰对采用串行干扰消除（SIC）的合法用户造成的不利影响，干扰功率必须满足 $\left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2 \le \left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}\right|^2$。因此，合法用户处的信干噪比（SINR）为 $\mathrm{SINR}_u = \left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2/\sigma^2$。合法用户和窃听者的速率可分别表示为 $R_u = \log(1 + \mathrm{SINR}_u)$ 和 $R_e = \log\left(1 + \left|\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2 / \left(\left|\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}\right|^2 + \sigma_e^2\right)\right)$。保密速率可表示为

$$R = [R_u - R_e]^+ = \max(0, R_u - R_e). \tag{7}$$

III. Algorithm Design for Secure Communication Systems

A. 问题建模

我们旨在通过联合优化基站预编码向量和超大规模可重构智能表面的相移矩阵，使保密速率最大化。该优化问题可表示为

$$\begin{aligned}\mathbf{P1}: \max_{\boldsymbol{w},\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}},\boldsymbol{\theta}}\ & g(\boldsymbol{w},\boldsymbol{\theta}) = [R_u - R_e]^+ \\ \text{s.t. }\ & \mathcal{C}_{\mathrm{BS}}: \|\boldsymbol{w}\|_2^2 + \|\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}\|_2^2 \le P_{\max}, \\ & \mathcal{C}_{\mathrm{th}}: \mathrm{SINR}_u \ge r_{\mathrm{th}}, \\ & \mathcal{C}_{\mathrm{SIC}}: \left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}\right|^2 \ge \left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2, \\ & \mathcal{C}_{\mathrm{RIS}}: |\theta_n| = 1,\ n = 1, 2, \ldots, N,\end{aligned} \tag{8}$$

其中，$\mathcal{C}_{\mathrm{BS}}$ 是基站的发射功率约束；$\mathcal{C}_{\mathrm{th}}$ 是合法用户的服务质量；$\mathcal{C}_{\mathrm{SIC}}$ 是解码约束；$\mathcal{C}_{\mathrm{RIS}}$ 用于确保超大规模可重构智能表面的恒模特性。由于该问题是非凸问题，且优化变量之间存在耦合，P1难以求解。因此，我们提出一种交替优化算法，将P1分解为两个子问题。

$$\boldsymbol{b}(\boldsymbol{r}_{re}) = \frac{1}{\sqrt{N}}\left[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}D_{re}(1,1)},\ldots,e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}D_{re}(1,N_2)},\ldots,e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}D_{re}(N_1,1)},\ldots,e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}D_{re}(N_1,N_2)}\right]^{\mathrm{T}}. \tag{5}$$

B. 基站预编码向量优化

给定超大规模可重构智能表面的相移矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$，P1可改写为

$$\mathbf{P2}: \max_{\boldsymbol{w},\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}} \ g(\boldsymbol{w}) = [R_u - R_e]^+ \quad \text{s.t. } \mathcal{C}_{\mathrm{BS}}, \mathcal{C}_{\mathrm{th}}, \mathcal{C}_{\mathrm{SIC}}. \tag{9}$$

为解决非凸问题，采用加权最小均方误差法

$$\min_{\boldsymbol{w},\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}} \ g_u(\boldsymbol{w}, u_u, \rho_u) + g_e(\boldsymbol{w}, \boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}, u_e, \rho_e) \ \text{s.t.} \mathcal{C}_{\mathrm{BS}}, \mathcal{C}_{\mathrm{th}}, \mathcal{C}_{\mathrm{SIC}}, \tag{10}$$

其中

$$\begin{aligned}
g_u(\boldsymbol{w}, u_u, \rho_u) &= \rho_u F_u(\boldsymbol{w}, u_u) - \log(\rho_u),\\
g_e(\boldsymbol{w}, \boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}, u_e, \rho_e) &= \rho_e F_e(\boldsymbol{w}, \boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}, u_e) - \log(\rho_e),\\
F_u(\boldsymbol{w}, u_u) &= |u_u|^2\left(\left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2 + \sigma^2\right) - 2\Re\{u_u^*\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\} + 1,\\
F_e(\boldsymbol{w}, \boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}, u_e) =& |u_e|^2\left(\left|\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2 + \left|\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}\right|^2 + \sigma_e^2\right)\\
&- 2\Re\{ju_e^*\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\} + 1.
\end{aligned}$$

u_u、ρ_u、u_e和 ρ_e 的解可通过闭式解求得：

$$u_u^\star = \frac{\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}}{\left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2 + \sigma^2}, \ \rho_u^\star = \left(1 - u_u^{\star,*}\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right)^{-1},$$

$$u_e^\star = \frac{j\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}}{\left|\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}\right|^2 + \sigma_e^2}, \ \rho_e^\star = \left(1 - u_e^{\star,*}j\boldsymbol{h}_e^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right)^{-1}.$$

为处理 $\mathcal{CN}_{\mathrm{th}}$ 和 $\mathcal{CN}_{\text{串行干扰消除}}$，我们采用基于逐次凸近似的算法来求解这些约束：

$$\begin{aligned}
&\mathcal{C}_{\mathrm{th}} \to 2\Re\{\hat{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_u\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\} - \Re\{\hat{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_u\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\hat{\boldsymbol{w}}\} \geq r_{\mathrm{th}}\sigma^2,\\
&\mathcal{C}_{\mathrm{SIC}} \to 2\Re\{\hat{\boldsymbol{w}}_{\mathrm{jam}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_u\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\} - \Re\{\hat{\boldsymbol{w}}_{\mathrm{jam}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_u\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\hat{\boldsymbol{w}}_{\mathrm{jam}}\} \geq \left|\boldsymbol{h}_u^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\right|^2,
\end{aligned} \tag{11}$$

其中，$\hat{}\ \boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}$ 和$\hat{}\boldsymbol{w}$ 表示前一次迭代循环中的最优解。

经过变换后，P2 是凸问题，可以使用现有工具箱（如 CVX）求解。

C. 超大规模可重构智能表面的相移矩阵优化

给定基站的预编码向量 $\boldsymbol{w}$ 和 $\boldsymbol{w}_{\mathrm{jam}}$，P1 可表示为

$$\mathbf{P3}: \max_{\boldsymbol{\theta}} \ g(\boldsymbol{\theta}) \ \text{ s.t. } \mathcal{C}_{\mathrm{th}}, \mathcal{C}_{\mathrm{SIC}}, \mathcal{C}_{\mathrm{RIS}}. \tag{12}$$

为求解 P3，我们将其改写为增广拉格朗日形式

$$\min_{\boldsymbol{\theta},\widetilde{\boldsymbol{\theta}}} \ g(\boldsymbol{\theta}) + \mu\left\|\widetilde{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\nu}\right\|_2^2 \ \text{ s.t. } \mathcal{C}_{\mathrm{th}}, \mathcal{C}_{\mathrm{SIC}}, \mathcal{C}_{\mathrm{RIS}}, \tag{13}$$

其中，$\mu > 0$ 和 $\boldsymbol{\nu} \in \mathbb{C}^{N^2\times 1}$。

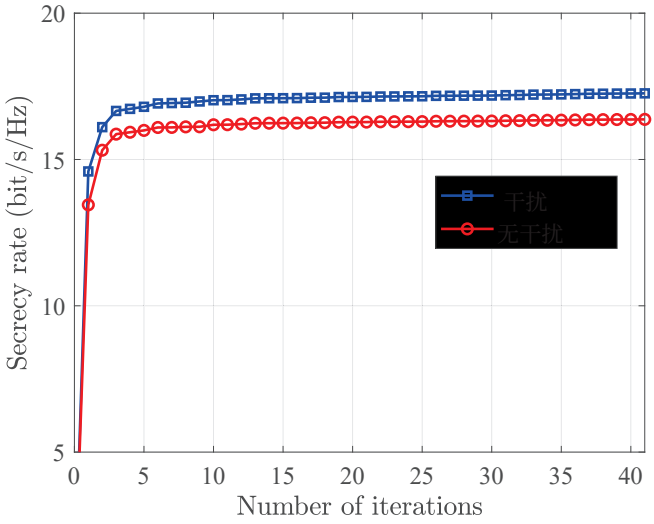


图2. 所提算法的收敛行为。

该非凸问题通过交替方向乘子法分三个迭代步骤求解：

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\theta}^{m+1} &= \arg\min_{\boldsymbol{\theta}} \ g(\boldsymbol{\theta}) + \mu\left\|\widetilde{\boldsymbol{\theta}}^m - \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\nu}^m\right\|_2^2 \ \text{s.t. } \mathcal{C}_{\mathrm{th}}, \mathcal{C}_{\mathrm{SIC}},\\
\widetilde{\boldsymbol{\theta}}^{m+1} &= \arg\min_{\widetilde{\boldsymbol{\theta}}} \left\|\widetilde{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}^{m+1} + \boldsymbol{\nu}^m\right\|_2^2 \ \text{s.t. } \mathcal{C}_{\mathrm{RIS}},\\
\boldsymbol{\nu}^{m+1} &= \boldsymbol{\nu}^m - \boldsymbol{\theta}^{m+1} + \widetilde{\boldsymbol{\theta}}^{m+1}.
\end{aligned} \tag{14}$$

与第三节B部分相同，我们应用加权最小均方误差 [15] 和基于逐次凸近似的算法，将步骤 i) 转换为凸形式，可通过 CVX 求解。为求解子问题 ii)，提出了一种直接投影法

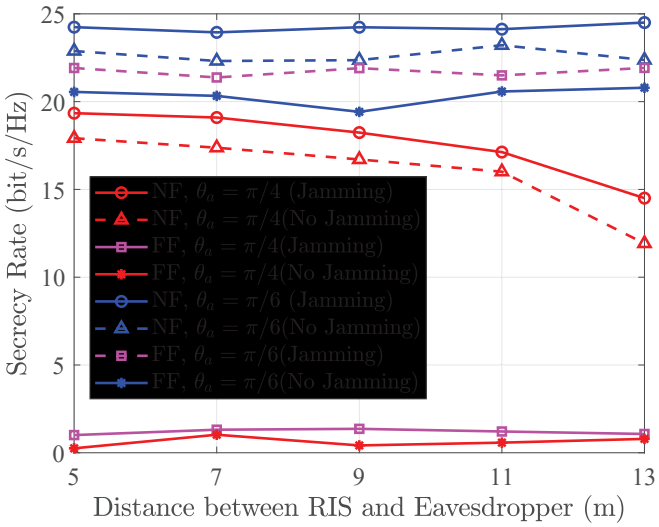
$$\widetilde{\boldsymbol{\theta}}^{m+1} = \begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{m+1} - \boldsymbol{\nu}^m, & \text{if } \left|\theta_n^{m+1} - \nu_n^m\right| = 1,\\ \frac{\boldsymbol{\theta}^{m+1} - \boldsymbol{\nu}^m}{\left|\boldsymbol{\theta}^{m+1} - \boldsymbol{\nu}^m\right|}, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{15}$$

然而，实现连续相移并不切实际。因此，我们采用线搜索策略来优化离散相移。对于 b比特量化，有 2^b 个离散相位级别 $\mathcal{F} \in \{-\pi, 2\pi/2^b - \pi, \ldots, (2^b-1)2\pi/2^b - \pi\}$ [16]。基于线搜索的离散相位优化可表示为

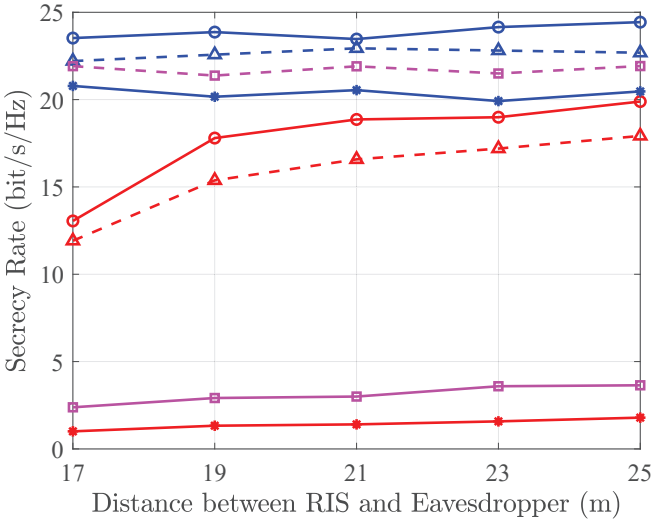
$$\widetilde{\theta}_n^{m+1} = \arg\min_{\widetilde{\theta}_n} \ \left\|\widetilde{\theta}_n - \theta_n^{m+1} + \nu_n^m\right\|_2^2 \ \text{ s.t. } \widetilde{\theta}_n \in \mathcal{F}. \tag{16}$$

D. 计算复杂度分析

该算法的主要计算复杂度在于求解 P2 和 P3。求解 P2 的 SOCP 的复杂度为 $\mathcal{O}(M^3K^3)$，求解 P3 对应的 ADMM 的复杂度为 $\mathcal{O}(N^3)$。



(a) 距离从 5 m 到 13 m



(b) 距离从 17 m 到 25 m

图 3. 保　密率与超大规模可重构智能表面和窃听者之间的距离　放器。

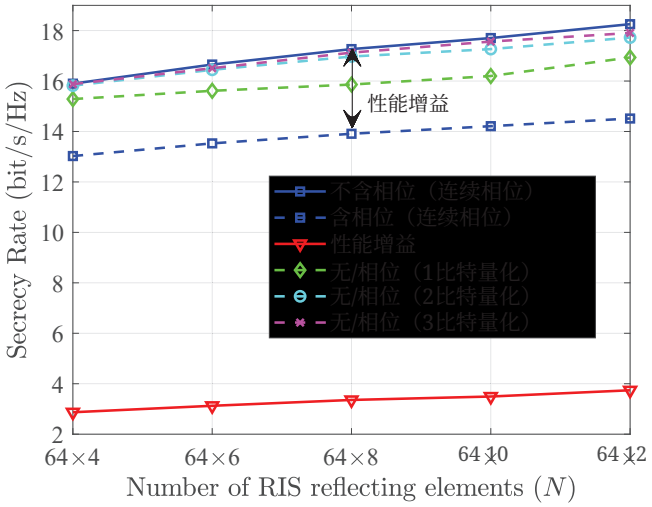


图 4. 保密速率与超大规模可重构智能表面单元数量 N 的关系。

IV. 仿真结果

本节给出仿真结果，以展示所提出的采用人工干扰的XL-RIS辅助近场安全通信方案的性能。XL-RIS置于yz平面上，其中点位于 (0, 0, 0)。BS位于 (100, -100, 0)。合法用户和窃听者均位于 $x-y$平面上。为方便起见，采用极坐标系表示其位置。窃听者位于 (10m $\pi/4$)，合法用户位于 (15m $\pi/4$)。默认参数设置为 $M = 8$, $N = 64 \times 8$, $\sigma^2 = \sigma_e^2 = -80$dBm,$r_{\text{th}} = 1$, $f = 10$GHz, $P_{\max} = 10$dBm。瑞利距离为 $d_R = 62.4$m。远场莱斯信道衰落 $\mathbf{G} = \sqrt{\beta_0 d^{-\alpha_{\text{BR}}}}\text{BR}\left(\sqrt{\frac{\kappa_{\text{BR}}}{\kappa_{\text{BR}}+1}}\mathbf{G}_L + \sqrt{\frac{1}{\kappa_{\text{BR}}+1}}\mathbf{G}_S\right)$，其中 $\beta_0 = -30$dB, $\alpha_{\text{BR}} = 2.2$ 且 $\kappa_{\text{BR}} = 3$dB。$\mathbf{G}_L \in \mathbb{C}^{N\times M}$为视距（LoS）分量。$\mathbf{G}_S \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{I})$为散射分量。对于近场信道，采用单径视距信道。信道增益为 $\beta_1 = (1+j)\zeta$，其中 $\zeta \sim \mathcal{N}(1, 0.1^2)$.

图2中展示了所提算法的收敛性能。可以看出，该算法在 40 次迭代内即可收敛。此外，采用人工干扰的方案比不采用人工干扰的方案具有更高的保密速率。

图 3 展示了不同角度下保密性能随超大规模可重构智能表面与窃听者之间距离的变化情况。当合法用户与窃听者的方位角相同，均为 $\pi/4$ 时，所提近场（NF）方案始终能够实现令人满意的保密速率。此外，随着窃听者的位置从 (5m $\pi/4$) 移至合法用户所在位置 (15m $\pi/4$)，保密速率降至零；当窃听者的位置继续远离合法用户时，保密速率则有所上升。这表明，位置越靠近超大规模可重构智能表面，其波束衍射能力越强。相比之下，远场（FF）通信系统中的保密速率几乎为零。这一对比表明，在角度方向相同的情况下，近场模型能够有效保障安全通信，而远场模型则不能。此外，当窃听者的方位角与合法用户的方位角不同时（例如，设为 $\pi/6$），保密速率随距离变化的幅度会减小。

作为比较，我们考虑图 4 中超大规模可重构智能表面采用随机（“w/s”）相移 $\boldsymbol{\theta}$ 的方案。优化后的（“wo/”）相移方案的保密速率显著高于随机方案。随着 N 数量的增加，性能差距进一步扩大。此外，采用 2 比特和 3比特量化时，保密性能与连续相位情形非常接近，这表明离散相位控制能够满足实际部署需求，同时降低硬件成本。

V. 结论

本文研究了通过人工干扰实现的XL-RIS辅助近场安全通信。保密速率

通过联合优化基站处的波束成形向量和XL-RIS处的相移矩阵来最大化。本文提出了一种低复杂度交替优化算法来解决该问题。此外，所提出的算法还可支持XL-RIS的离散相位优化，从而降低硬件成本。仿真结果表明，当窃听者试图位于安全盲区内窃听合法用户时，该方案仍能确保安全传输。未来，我们计划研究不完美信道状态信息的影响。

参考文献

[1] S. Gong、X. Lu、D. Hoang、D. Niyato、L. Shu 和 D. Kim，《通过智能反射面实现智能无线通信：当代综述》，IEEE Commun. Surv. Tutorials，第 22 卷，第 4 期，2283–2314 页，2020 年。[2] Q. Zhang、Z. Du、Y. Zhao、Y. L. Guan、J. Liu 和 C. Yuen，《面向 SIM 辅助 ISAC 系统的联合功率分配与离散相移优化》，IEEE Trans. Veh. Technol.，第 74 卷，第 12 期，19 795–19 800 页，2025 年。[3] Q. Zhang、G. Luo、Z. Dong、F. Sun、X. Wang 和 J. Liu，《增强 NOMA 系统的超对角可重构智能表面》，IEEE Wireless Commun. Lett.，第 14 卷，第 1 期，118–122 页，2025 年。[4] P. Xu、W. Tan、Z. Li、C. Li 和 R. Zhao，《IRS 与 AN 辅助 MISO 系统中的传输：保密能效最大化》，IEEE Commun. Lett.，第 29 卷，第 4 期，858–862 页，2025 年。[5] Q. Zhang、J. Liu、Z. Gao、Z. Li、Z. Peng、Z. Dong 和 H. Xu，《针对收发器硬件损伤的 RIS 辅助 NOMA 安全网络的鲁棒波束成形设计》，IEEE Trans. Commun.，第 71 卷，第 6 期，3637–3649 页，2023 年。[6] H. Sun、S. Zhang、J. Ma 和 O. A. Dobre，《具有开/关模式的 RIS 辅助空间调制的路径损耗》，IEEE Wireless Commun. Lett.，第 26 卷，第 4 期，937–941 页，2022 年。[7] M. Cui、Z. Wu、Y. Lu、X. Wei 和 L. Dai，《面向 6G 的近场 MIMO 通信：基础、挑战、潜力与未来方向》，IEEE Commun. Mag.，第 61 卷，第 1 期，40–46 页，2023 年。[8] Q. Zhang、Z. Dong、Y. Zhao、Y. Ge、Y. L. Guan、J. Liu 和 C. Yuen，《面向离散超大规模可重构智能表面辅助近场 MIMO 系统的多分辨率码本设计与多用户干扰管理》，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 25 卷，2826–2842 页，2026 年。[9] Z. Zhang、Y. Liu、Z. Wang、X. Mu 和 J. Chen，《近场通信中的物理层安全》，IEEE Open J. Commun. Soc.，第 73 卷，第 7 期，10 761–10 766 页，2024 年。[10] J. Liu、G. Yang、Y. Liu 和 X. Zhou，《RIS赋能的近场隐蔽通信》，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 23 卷，第 10 期，15 477–15 492 页，2024 年。[11] W. Wang、X. Liu、J. Tang、N. Zhao、Y. Chen 和 Z. Ding，《面向 IRS 辅助安全 NOMA 网络的波束成形与干扰优化》，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 21 卷，第 3 期，1557–1569 页，2022 年。[12] X. Hu、C. Kai、Z. Guo 和 J. Gao，《一种保障无线通信安全的快速前向全双工协作中继方案》，IEEE Signal Process. Lett.，第 26 卷，第 5 期，775–779 页，2019 年。[13] Y. Cheng、C. Huang、W. Peng、M. Debbah、L. Hanzo 和 C. Yuen，《RIS 辅助近场宽带上行链路的可达速率优化》，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 23 卷，2311，2024 3，2296 no. pp. – 。[14] C. Wang、Z. Li、J. Shi 和 D. Ng，《智能反射面辅助多天线隐蔽通信：有源与无源波束成形联合优化》，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 69 卷，第 6 期，3984–4000 页，2021 年。[15] Q. Zhang、M. Shao、Q. Li 和 J. Liu，《一种用于大规模有源 RIS 辅助 MIMO 系统多用户和速率最大化的高效算法》，载于 ICASSP 2024 - 2024 IEEE 国际声学、语音与信号处理会议（ICASSP），2024 年，9036–9040 页。[16] Q. Zhang、J. Liu、H. Tang、Z. Dong 和 Y. Li，《不完美信道状态信息下实用的 RIS 辅助多用户通信：实用模型、幅度反馈与波束成形优化》，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 23 卷，第 10 期，15 245–15 260 页，2024 年。