

# 可转向天线辅助的多用户 MISO 物理层密钥生成

朱政宇<sup>1,2</sup>, 柳记通<sup>3</sup>, 李鑫泽<sup>1</sup>, 郑倍雄<sup>4</sup>, 金 梁<sup>5</sup>, 黄开枝<sup>5</sup>, 钟 州<sup>5\*</sup>

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南郑州 450001; 2. 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 陕西西安 710071; 3. 郑州大学网络空间安全学院, 河南郑州 450002; 4. 华南理工大学微电子学院, 广东广州 511442; 5. 信息工程大学, 河南郑州 450002)

**摘要:** 针对无线通信系统中存在的窃听攻击与信息泄露风险, 提出一种可转向天线(Rotatable Antenna, RA)辅助的多用户多输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)系统的物理层密钥生成(Physical Layer Key Generation, PLKG)方案. 通过利用RA的方向可控特性, 构建了以系统密钥和速率最大化为目标函数, 以总功率、各用户最低服务质量、RA最大天顶角及指向向量归一化为约束条件的优化问题. 为求解该非凸问题, 设计了一种基于交替优化(Alternating Optimization, AO)、半正定松弛(Semi-Definite Relaxation, SDR)、连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)的优化算法. 仿真结果表明, 所提方案相较于基准方案具有更高的密钥和速率, 验证了RA在提高物理层密钥生成速率方面的有效性.

**关键词:** 可转向天线; 物理层密钥生成; 交替优化; 半正定松弛; 连续凸逼近

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.62571495, No.62571182, No.62571193, No.U22A2001); 河南省自然科学基金优秀项目(No.232300421097); 河南省高校科技创新人才支持计划(No.23HASTIT019); 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室开放课题(No.ISN25-24)

中图分类号: TN918.4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)12-4296-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250959

## Rotatable Antenna-Aided Multi-User MISO Physical Layer Key Generation

ZHU Zheng-yu<sup>1,2</sup>, LIU Ji-tong<sup>3</sup>, LI Xin-ze<sup>1</sup>, ZHENG Bei-xiong<sup>4</sup>, JIN Liang<sup>5</sup>, HUANG Kai-zhi<sup>5</sup>, ZHONG Zhou<sup>5\*</sup>

(1. School of Electrical Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

3. School of Cyber Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

4. School of Micro-Electronics South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 511442, China;

5. Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**Abstract:** Aiming at the eavesdropping attacks and information leakage risks existing in wireless communication systems, a physical layer key generation (PLKG) scheme for multi-user multiple input single output (MISO) systems assisted by rotatable antenna (RA) is proposed. By utilizing the directional controllability of RA, an optimization problem is constructed, where the objective function is the maximization of the system's sum key generation rate, and the constraints include total transmit power, the minimum quality of service requirements for each user, the maximum zenith angle of RA, and the normalization of the pointing vector. To solve this non-convex problem, an optimization algorithm based on alternating optimization (AO), semi-definite relaxation (SDR), and successive convex approximation (SCA) is designed. Simulation results show that the proposed scheme exhibits a higher sum key generation rate compared with the benchmark scheme, which demonstrates the effectiveness of RA in enhancing the physical layer key generation rate.

**Key words:** rotatable antenna; physical layer key generation; alternating optimization; semi-definite relaxation; successive convex approximation

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62571495, No.62571182, No.62571193, No.U22A2001); Natural Science Foundation of Henan Province (No.232300421097); Program for Science & Technology

Innovation Talents in Universities of Henan Province (No.23HASTIT019); State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University (No.ISN25-24)

## 1 引言

随着无线通信技术的快速发展和物联网设备的广泛部署,无线网络中的信息安全问题日益突出.由于无线信道的广播特性,通信链路极易遭受窃听和未授权访问,造成敏感信息泄露<sup>[1,2]</sup>.为应对这一挑战,物理层安全(Physical Layer Security, PLS)技术作为一种利用无线信道独有的物理属性,直接从物理层为无线通信提供安全保障的手段,受到了广泛关注<sup>[3]</sup>.物理层密钥生成(Physical Layer Key Generation, PLKG)是 PLS 的核心技术之一,无需依赖高复杂度的加密算法即可实现安全通信,其利用无线信道的互易性、随机性和时变性,使通信双方能够生成共享密钥序列,从而为上层加密提供安全基础<sup>[4,5]</sup>.

传统的 PLKG 方案主要基于固定天线结构,该结构的自由度有限,难以充分利用信道的变化特性,进而导致密钥生成速率受限<sup>[6]</sup>.近年来,智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)技术被引入以增强 PLKG 性能,通过优化 IRS 相移以提高合法上下行信道间的相关性,进而提升密钥生成性能<sup>[7]</sup>.文献[8]研究了 IRS 辅助的无线通信网络的密钥生成方案,通过优化 IRS 反射系数,显著提升了密钥生成性能.文献[9]研究了离散相移 IRS 辅助的 PLKG 模型,提出了一种基于线性锥重构(Linear Conic Reformulation, LCR)与连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)的算法,通过优化 IRS 相移以最大化密钥生成速率.文献[10,11]研究了多天线场景下 IRS 辅助的密钥生成方案,通过联合优化基站的波束成形向量与 IRS 的反射系数以提升密钥生成性能.文献[12]研究了 IRS 辅助的多用户密钥生成方案,提出了一种基于半正定松弛(Semi-Definite Relaxation, SDR)与 SCA 的算法,通过优化 IRS 相移以最大化密钥和速率.文献[13]研究了多 IRS 辅助的 PLKG 方案,通过联合优化基站的波束成形向量与各 IRS 的相移以最大化加权密钥和速率.然而,IRS 仅能反射信号,无法同时服务两侧用户,限制了其在全空间覆盖场景中的应用<sup>[14,15]</sup>.

为进一步拓展空间自由度并实现更灵活的无线环境调控,可转向天线(Rotatable Antenna, RA)作为一种新兴技术受到广泛关注.RA 可通过灵活调整天线的三维指向,动态重构天线阵列的方向性增益模式,为无线通信系统引入新的空间自由度<sup>[16,17]</sup>.RA 能够优化信号传输路径与能量聚焦,增强期望方向的信号强度,同时有效抑制非期望方向的辐射功率,进而提升通信性能与物理层安全性<sup>[18,19]</sup>.已有研究证明了 RA 在提升保密

速率(Secrecy Rate, SR)方面的潜力<sup>[19]</sup>,但其在 PLKG 系统中的应用尚未得到充分探索.

针对上述问题,本文提出一种 RA 辅助的多用户多输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)系统的 PLKG 方案.该方案通过联合优化接入点(Access Point, AP)处的波束成形向量与 RA 的偏转角矩阵,以最大化系统的密钥和速率.本文的主要贡献如下:

(1)在满足总功率约束、各用户最低服务质量约束、RA 最大天顶角约束及指向向量归一化约束的前提下,通过联合设计 AP 处的波束成形向量与 RA 的偏转角矩阵,构建了系统密钥和速率最大化问题.

(2)针对上述非凸且变量严重耦合的优化问题,设计了 AO-SCA 算法,首先,利用交替优化(Alternating Optimization, AO)算法将其分解为波束成形向量优化子问题与偏转角矩阵优化子问题;其次,利用 SDR 与 SCA 方法将非凸问题转化为凸问题;最后,利用 CVX 等工具进行求解.

(3)仿真结果验证了所提算法能快速收敛,并通过与基准方案对比,证明了所提方案能显著提高密钥生成速率.

## 2 系统模型

### 2.1 系统描述

RA 辅助的多用户 MISO 系统如图 1 所示,其中多天线 AP 服务  $K$  个单天线合法用户,利用 RA 辅助密钥生成.AP 与合法用户采用时分双工(Time Division Duplexing, TDD)模式进行通信,以确保上下行信道满足互易性<sup>[20]</sup>.在合法用户周围存在窃听者,试图窃听合法通信方的信息.

AP 配备了一个由  $M$  个 RA 组成的均匀平面阵列(Uniform Planar Array, UPA),假设 UPA 位于三维笛卡尔坐标系的  $x$ - $y$  平面上,其中  $M \triangleq M_x M_y$ ,  $M_x$  和  $M_y$  分别为沿  $x$  轴和  $y$  轴的天线数量.为了便于描述,将 UPA 的参考位置设于坐标原点,相邻 RA 间距为  $d$ ,则位于第  $m_x$  列、第  $m_y$  行的 RA 的参考位置为

$$\mathbf{u}_m \triangleq [m_x d, m_y d, 0]^T \quad (1)$$

其中,  $m_x = 0, 1, \dots, M_x - 1$ ,  $m_y = 0, 1, \dots, M_y - 1$ . 设第  $k$  个用户与坐标原点的距离为  $r_k$ ,则用户  $k$  的位置为

$$\mathbf{q}_k = [r_k \Omega_k, r_k \Phi_k, r_k \Psi_k]^T \quad (2)$$

其中,  $\Omega_k = \sin \theta_k \cos \varphi_k$ ,  $\Phi_k = \sin \theta_k \sin \varphi_k$ ,  $\Psi_k = \cos \theta_k$ ,  $\theta_k$  和  $\varphi_k$  分别为用户  $k$  的天顶角和方位角,天顶角为用户方向与  $z$  轴的夹角,方位角为用户方向在  $x$ - $y$  平面的投影与  $x$  轴正方向的夹角.

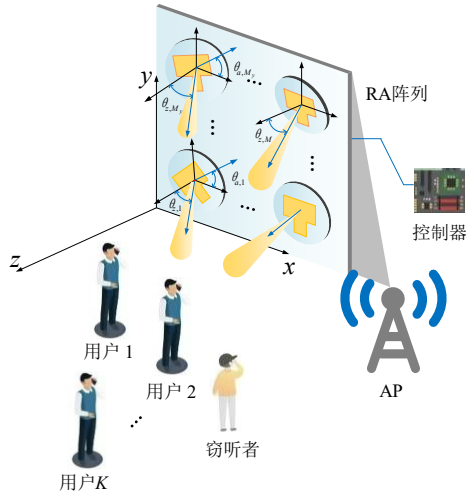


图1 RA辅助的多用户MISO系统

每个RA的指向可由智能控制器在三维空间内独立进行机械或电子调节<sup>[19]</sup>。其方向通过两个偏转角描述:天顶角 $\theta_{z,m}$ 和方位角 $\theta_{a,m}$ ,其中 $\theta_{z,m}$ 表示第 $m$ 个RA的方向与 $z$ 轴的夹角, $\theta_{a,m}$ 表示第 $m$ 个RA的方向在 $x-y$ 平面的投影与 $x$ 轴正方向的夹角。第 $m$ 个RA的指向向量为

$$\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}_m) = \begin{bmatrix} \sin(\theta_{z,m}) \cos(\theta_{a,m}), \sin(\theta_{z,m}) \sin(\theta_{a,m}), \cos(\theta_{z,m}) \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{\theta}_m = [\theta_{z,m}, \theta_{a,m}]^T$ 为偏转角向量,满足归一化条件 $\|\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}_m)\| = 1$ 。考虑到RA的机械限制, $\theta_{z,m}$ 需满足:

$$0 \leq \theta_{z,m} \leq \theta_{\max}, \forall m \quad (4)$$

其中, $\theta_{\max} \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 为允许调节的最大天顶角。

## 2.2 信道模型

每个RA的有效天线增益遵循如下方向增益模式<sup>[19]</sup>:

$$G_e(\epsilon, \varphi) = \begin{cases} G_0 \cos^{2p}(\epsilon), & \epsilon \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \varphi \in [0, 2\pi) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $(\epsilon, \varphi)$ 为相对于RA方向的入射角; $G_0 = 2(2p+1)$ 为满足能量守恒定律的视轴方向上的最大增益; $p$ 为方向性因子,决定天线主瓣波束宽度。第 $m$ 个RA与第 $k$ 个用户间的方向增益为

$$G_{m,k} = G_0 \cos^{2p}(\epsilon_{m,k}) \quad (6)$$

其中, $\cos(\epsilon_{m,k}) \triangleq \mathbf{f}^T(\boldsymbol{\theta}_m) \mathbf{q}_{m,k}$ 为单位方向向量

$\mathbf{q}_{m,k} \triangleq \frac{\mathbf{q}_k - \mathbf{u}_m}{\|\mathbf{q}_k - \mathbf{u}_m\|}$ 与第 $m$ 个RA的指向向量之间的投影。

假设所有信道经历准静态平坦衰落,则第 $m$ 个RA

到第 $k$ 个用户的信道建模为

$$h_{m,k}(\boldsymbol{\theta}_m) = \sqrt{L(d_{m,k})} G_{m,k} \mathbf{g}_{m,k} \quad (7)$$

其中, $L(d_{m,k}) = \beta_0 d_{m,k}^{-\alpha}$ , $\beta_0$ 为1米处的路径损耗; $\alpha$ 为路径损耗指数; $d_{m,k}$ 为第 $m$ 个RA与用户 $k$ 之间的距离。小尺度衰落分量 $\mathbf{g}_{m,k}$ 服从独立莱斯分布:

$$\mathbf{g}_{m,k} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \bar{\mathbf{g}}_{m,k} + \sqrt{\frac{1}{\kappa+1}} \tilde{\mathbf{g}}_{m,k} \quad (8)$$

其中, $\kappa$ 为莱斯因子; $\bar{\mathbf{g}}_{m,k} = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{m,k}}$ 为视距分量; $\tilde{\mathbf{g}}_{m,k} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 为非视距分量。因此,从AP到用户 $k$ 的信道为

$$\mathbf{h}_k(\boldsymbol{\theta}) = [h_{1,k}(\boldsymbol{\theta}_1), h_{2,k}(\boldsymbol{\theta}_2), \dots, h_{M,k}(\boldsymbol{\theta}_M)]^T \quad (9)$$

其中, $\boldsymbol{\theta} \triangleq [\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_M] \in \mathbb{R}^{2 \times M}$ 为偏转角矩阵。

## 3 RA辅助的多用户MISO系统的密钥生成方案

如图2所示,RA辅助的多用户MISO系统的密钥生成方案包括五个步骤。

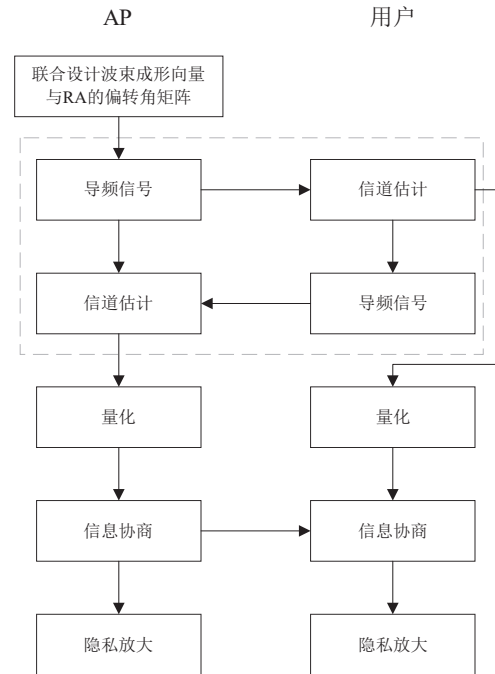


图2 RA辅助的多用户MISO系统的PLKG方案

首先是联合设计波束成形向量与RA的偏转角矩阵,将在第4节中详细介绍。

其次是信道估计。AP与用户互相发送导频信号以估计信道。下行探测阶段,AP广播导频信号 $s_d$ ,满足 $s_d s_d^* = 1$ 。用户 $k$ 的接收信号为

$$y_{d,k} = (\mathbf{h}_k(\boldsymbol{\theta}))^T \mathbf{w}_k s_d + n_{d,k} \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  为 AP 处的波束成形向量, 满足  $\sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \leq P_A$ ;  $P_A$  为 AP 的发送功率;  $n_{d,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  为用户  $k$  处的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN). 采用最小二乘 (Least Squares, LS) 法估计, 信道估计值为

$$\hat{h}_{d,k} = y_{d,k} s_d^* (s_d s_d^*)^{-1} = (\mathbf{h}_k(\boldsymbol{\theta}))^T \mathbf{w}_k + \varepsilon_{d,k} \quad (11)$$

其中,  $\varepsilon_{d,k} = n_{d,k} s_d^*$ . 上行探测阶段, 各用户均向 AP 发送导频信号  $\mathbf{s}_{u,k} \in \mathbb{C}^{1 \times K}$ . 不同用户的导频信号需满足正交性:

$$\mathbf{s}_{u,k} (\mathbf{s}_{u,k'})^H = \begin{cases} 1, & k=k' \\ 0, & k \neq k' \end{cases} \quad (12)$$

因此, AP 的接收信号为

$$\mathbf{y}_u = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_U} \mathbf{h}_k(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{s}_{u,k} + n_u \quad (13)$$

其中,  $P_U$  为用户的发送功率, 满足  $P_U = P_A = P$ .  $n_u \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  为 AP 处的 AWGN. 采用 LS 法估计, 信道估计值为

$$\hat{h}_{u,k} = \mathbf{y}_u (\mathbf{s}_{u,k})^H \left( \mathbf{s}_{u,k} (\mathbf{s}_{u,k})^H \sqrt{P} \right)^{-1} = \mathbf{h}_k(\boldsymbol{\theta}) + \varepsilon_{u,k} \quad (14)$$

其中,  $\varepsilon_{u,k} = n_u (\mathbf{s}_{u,k})^H / \sqrt{P}$ .

为了获取互易的信道增益, 将 AP 的信道估计值  $\hat{h}_{u,k}$  与  $\mathbf{w}_k$  相乘, 得到:

$$\hat{h}_{u,k} \mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k^T \hat{h}_{u,k} = \mathbf{w}_k^T \mathbf{h}_k(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{w}_k^T \varepsilon_{u,k} \quad (15)$$

最后, AP 与用户对信道估计值进行量化、信息协商和隐私放大生成密钥<sup>[21]</sup>. 由于最后三个步骤与现有密钥生成方案中的步骤相似<sup>[10-12]</sup>, 因此本文的重点是优化波束成形向量与 RA 的偏转角矩阵以最大化密钥和速率.

## 4 波束成形向量与 RA 的偏转角矩阵联合设计

本节首先构建了 RA 辅助的多用户 MISO 系统密钥和速率最大化问题; 其次, 设计了 AO-SCA 算法, 利用 AO 算法将原问题分解为两个子问题, 并采用 SDR 与 SCA 方法将非凸问题转化为凸问题, 利用 CVX 等工具进行求解; 最后, 给出复杂度分析.

### 4.1 问题描述

密钥生成速率为合法方的  $\hat{h}_{u,k}$  和  $\hat{h}_{d,k}$  在窃听者的  $\hat{h}_{d,k}$  下的条件互信息, 表示为

$$I = I(\hat{h}_{u,k}; \hat{h}_{d,k} | \hat{h}_{d,k}) \stackrel{(b)}{=} I(\hat{h}_{u,k}; \hat{h}_{d,k}) \quad (16)$$

其中, 等式 (b) 成立是由于窃听者距离合法通信双方距离超过半个波长, 窃听信道与合法信道不相关<sup>[22-24]</sup>. 因此, 密钥和速率为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K I(\hat{h}_{u,k}; \hat{h}_{d,k}) = \sum_{k=1}^K -\log_2(1 - \zeta^2) \quad (17)$$

其中,  $\zeta$  为相关系数, 表示为

$$\zeta = \frac{\mathbb{E}(\hat{h}_{u,k}; \hat{h}_{d,k})}{\sigma_{\hat{h}_{u,k}} \sigma_{\hat{h}_{d,k}}} \quad (18)$$

其中, 信道协方差为

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\hat{h}_{u,k}; \hat{h}_{d,k}) &= \mathbb{E}\left(\left(\hat{h}_{d,k} - \mathbb{E}(\hat{h}_{d,k})\right)\left(\hat{h}_{u,k} - \mathbb{E}(\hat{h}_{u,k})\right)^*\right) \\ &= \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \mathbf{F} \mathbf{w}_k \end{aligned} \quad (19)$$

其中,

$$\mathbf{F} \triangleq \text{diag}\left[\left[L(d_{1,k})(\mathbf{f}^T(\boldsymbol{\theta}_1) \mathbf{q}_{1,k})^{2p}, L(d_{2,k})(\mathbf{f}^T(\boldsymbol{\theta}_2) \mathbf{q}_{2,k})^{2p}, \dots, L(d_{M,k})(\mathbf{f}^T(\boldsymbol{\theta}_M) \mathbf{q}_{M,k})^{2p}\right]^T\right]$$

信道方差为

$$\sigma_{\hat{h}_{u,k}}^2 = \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \mathbf{F} \mathbf{w}_k + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^2 / P \quad (20)$$

$$\sigma_{\hat{h}_{d,k}}^2 = \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \mathbf{F} \mathbf{w}_k + \sigma^2 \quad (21)$$

将式 (18)~(21) 代入式 (17), 得到密钥和速率表达式:

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P \left( \frac{G_0}{\kappa+1} \right)^2 (\mathbf{w}_k^H \mathbf{F} \mathbf{w}_k)^2}{\left( P \sigma^2 + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^2 \right) \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \mathbf{F} \mathbf{w}_k + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^4} \right) \quad (22)$$

本文在满足总功率约束、各用户最低服务质量约束、RA 最大天顶角约束及指向向量归一化约束的前提下, 通过联合优化 AP 处的波束成形向量  $\mathbf{w}_k$  与 RA 的偏转角矩阵  $\boldsymbol{\theta}$  以最大化密钥和速率. 因此, 优化问题为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}_k, \boldsymbol{\theta}} R_{\text{sum}} \\ & \text{s.t. } C_1: 0 \leq \theta_{z,m} \leq \theta_{\max}, \forall m \\ & C_2: \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \leq P_A \\ & C_3: \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \geq P_{\min}, \forall k \\ & C_4: \|\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}_m)\| = 1, \forall m \end{aligned} \quad (23)$$

其中, 约束条件  $C_3$  表示各用户分配的功率大于最低功率要求, 用以满足各用户的最低服务质量需求. 由于优化变量  $\mathbf{w}_k$  与  $\boldsymbol{\theta}$  的高度耦合及目标函数中有对数和分式运算, 因此问题式 (23) 是个非凸问题. 下文利用 AO 算法将其分解为两个子问题进行求解.

### 4.2 波束成形向量优化子问题

固定偏转角矩阵, 定义  $\mathbf{W}_k = \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H$ , 满足  $\text{rank}(\mathbf{W}_k) = 1$ ,

$\mathbf{W}_k \geq 0$ , 波束成形向量优化子问题转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_k} \sum_{k=1}^K \left( \log_2(g_0(\mathbf{W}_k)) - \log_2(g_1(\mathbf{W}_k)) \right) \\ \text{s.t. } & \text{C}_5: \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{W}_k) \leq P_A \\ & \text{C}_6: \text{Tr}(\mathbf{W}_k) \geq P_{\min}, \forall k \\ & \text{C}_7: \text{rank}(\mathbf{W}_k) = 1, \forall k \\ & \text{C}_8: \mathbf{W}_k \geq 0, \forall k \end{aligned} \quad (24)$$

其中,

$$\begin{aligned} g_0(\mathbf{W}_k) = & P \left( \frac{G_0}{\kappa+1} \right)^2 \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{W}_k\mathbf{F}\mathbf{W}_k) + \frac{P\sigma^2 G_0}{\kappa+1} \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{W}_k) \\ & + \frac{\sigma^2 G_0}{\kappa+1} \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{W}_k\mathbf{W}_k) + \text{Tr}(\mathbf{W}_k)\sigma^4 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} g_1(\mathbf{W}_k) = & \frac{P\sigma^2 G_0}{\kappa+1} \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{W}_k) \\ & + \frac{\sigma^2 G_0}{\kappa+1} \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{W}_k\mathbf{W}_k) + \text{Tr}(\mathbf{W}_k)\sigma^4 \end{aligned} \quad (26)$$

问题式(24)仍然是一个非凸优化问题,难以直接求解. 对于约束条件 $\text{C}_7$ ,采用SDR方法,直接放弃此非凸约束条件而不影响解的最优性<sup>[25]</sup>. 对于表达式 $\log_2(g_0(\mathbf{W}_k))$ 与 $\log_2(g_1(\mathbf{W}_k))$ ,利用SCA方法在给定 $\mathbf{W}_k^{(i)}$ 处进行一阶泰勒展开,得到:

$$\begin{aligned} T(\mathbf{W}_k) = & \log_2(g_0(\mathbf{W}_k^{(i)})) \\ & + \text{Tr} \left( \nabla_{\mathbf{W}_k} \log_2(g_0(\mathbf{W}_k^{(i)}))^H (\mathbf{W}_k - \mathbf{W}_k^{(i)}) \right) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} A(\mathbf{W}_k) = & \log_2(g_1(\mathbf{W}_k^{(i)})) \\ & + \text{Tr} \left( \nabla_{\mathbf{W}_k} \log_2(g_1(\mathbf{W}_k^{(i)}))^H (\mathbf{W}_k - \mathbf{W}_k^{(i)}) \right) \end{aligned} \quad (28)$$

其中,

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{W}_k} \log_2(g_0(\mathbf{W}_k^{(i)})) \\ = & \frac{2P \left( \frac{G_0}{\kappa+1} \right)^2 \mathbf{F}\mathbf{W}_k^{(i)}\mathbf{F} + \frac{P\sigma^2 G_0}{\kappa+1} \mathbf{F} + 2 \frac{\sigma^2 G_0}{\kappa+1} \mathbf{F}\mathbf{W}_k^{(i)} + \sigma^4}{g_0(\mathbf{W}_k^{(i)}) \ln 2} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\Upsilon(\mathbf{F}) \triangleq \log_2(g_2(\hat{\mathbf{F}})) + \frac{2p \left( P\sigma^2 + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^2 + \frac{2PG_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \hat{\mathbf{F}} \mathbf{w}_k \right) \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \hat{\mathbf{F}} \mathbf{w}_k}{g_2(\hat{\mathbf{F}}) \ln 2} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(\mathbf{F}) \triangleq & \log_2(g_3(\hat{\mathbf{F}})) \\ & + \frac{2p \left( P\sigma^2 + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^2 \right) \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \hat{\mathbf{F}} \mathbf{w}_k}{g_3(\hat{\mathbf{F}}) \ln 2} \end{aligned} \quad (37)$$

其中,

$$\nabla_{\mathbf{W}_k} \log_2(g_1(\mathbf{W}_k^{(i)})) = \frac{P\sigma^2 G_0 \mathbf{F} + 2 \frac{\sigma^2 G_0}{\kappa+1} \mathbf{F}\mathbf{W}_k^{(i)} + \sigma^4}{g_1(\mathbf{W}_k^{(i)}) \ln 2} \quad (30)$$

其中, $\mathbf{W}_k^{(i)}$ 为 $\mathbf{W}_k$ 第*i*次迭代的结果. 问题式(24)可转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_k} \sum_{k=1}^K \left( T(\mathbf{W}_k) - A(\mathbf{W}_k) \right) \\ \text{s.t. } & \text{C}_5, \text{C}_6, \text{C}_8 \end{aligned} \quad (31)$$

问题式(31)为半正定规划(Semi-Definite Program, SDP)问题,可利用CVX等工具箱进行求解. 由于放弃了秩1约束,因此需要考虑两种不同的情况:如果得到的解满足秩1约束,则采用特征值分解(Eigen Value Decomposition, EVD)得到 $\mathbf{w}_k$ ;否则采用高斯随机化方法构造秩为1的近似解<sup>[26]</sup>.

### 4.3 偏转角矩阵优化子问题

固定波束成形向量,定义 $\mathbf{f}_m = \mathbf{f}(\theta_m)$ ,  $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_M]$ ,偏转角矩阵优化子问题转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\tilde{\mathbf{F}}} \sum_{k=1}^K \left( \log_2(g_2(\tilde{\mathbf{F}})) - \log_2(g_3(\tilde{\mathbf{F}})) \right) \\ \text{s.t. } & \text{C}_9: \mathbf{f}_m^T \mathbf{e}_3 \geq \cos(\theta_{\max}), \forall m \\ & \text{C}_{10}: \|\mathbf{f}_m\| = 1, \forall m \end{aligned} \quad (32)$$

其中, $\mathbf{e}_3 = [0, 0, 1]^T$ ,

$$\begin{aligned} g_2(\tilde{\mathbf{F}}) = & \left( P\sigma^2 + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^2 \right) \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \tilde{\mathbf{F}} \mathbf{w}_k + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^4 \\ & + P \left( \frac{G_0}{\kappa+1} \right)^2 \left( \mathbf{w}_k^H \tilde{\mathbf{F}} \mathbf{w}_k \right)^2 \end{aligned} \quad (33)$$

$$g_3(\tilde{\mathbf{F}}) = \left( P\sigma^2 + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^2 \right) \frac{G_0}{\kappa+1} \mathbf{w}_k^H \tilde{\mathbf{F}} \mathbf{w}_k + \|\mathbf{w}_k\|_2^2 \sigma^4 \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{F}} = & \text{diag} \left( \left[ L(d_{1,k}) (\mathbf{f}_1^T \mathbf{q}_{1,k})^{2p}, L(d_{2,k}) (\mathbf{f}_2^T \mathbf{q}_{2,k})^{2p}, \right. \right. \\ & \left. \left. \dots, L(d_{M,k}) (\mathbf{f}_M^T \mathbf{q}_{M,k})^{2p} \right]^T \right) \end{aligned} \quad (35)$$

约束条件 $\text{C}_9$ 等价于 $\text{C}_1$ . 对于约束条件 $\text{C}_{10}$ ,将其松弛为 $\|\mathbf{f}_m\| \leq 1, \forall m$ <sup>[19]</sup>. 对于表达式 $\log_2(g_2(\tilde{\mathbf{F}}))$ 与 $\log_2(g_3(\tilde{\mathbf{F}}))$ ,同样利用SCA方法在给定 $\mathbf{f}_m^{(i)}$ 处进行一阶泰勒展开,得到:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{F}} = & \text{diag} \left( \left[ L(d_{1,k}) \left( (\mathbf{f}_1^{(i)})^T \mathbf{q}_{1,k} \right)^{2p}, \right. \right. \\ & \left. \left. \dots, L(d_{M,k}) \left( (\mathbf{f}_M^{(i)})^T \mathbf{q}_{M,k} \right)^{2p} \right]^T \right) \end{aligned} \quad (38)$$

$$\hat{\mathbf{F}} = \text{diag} \left( \left[ L(d_{1,k}) \left( \left( (\mathbf{f}_1^{(i)})^T \mathbf{q}_{1,k} \right)^{2p-1} \mathbf{q}_{1,k} \right)^T (\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_1^{(i)}), \right. \right. \\ \left. \left. \dots, L(d_{M,k}) \left( \left( (\mathbf{f}_M^{(i)})^T \mathbf{q}_{M,k} \right)^{2p-1} \mathbf{q}_{M,k} \right)^T (\mathbf{f}_M - \mathbf{f}_M^{(i)}) \right] \right)^T \quad (39)$$

其中,  $\mathbf{f}_m^{(i)}$  为  $\mathbf{f}_m$  第  $i$  次迭代的结果. 问题式(32)可转化为

$$\max_{\mathbf{F}} \sum_{k=1}^K (\gamma(\mathbf{F}) - \Gamma(\mathbf{F})) \\ \text{s.t. } \mathbf{C}_{11}: \|\mathbf{f}_m\| \leq 1, \forall m \\ \mathbf{C}_9 \quad (40)$$

问题式(40)是一个凸优化问题,可利用 CVX 进行求解<sup>[27]</sup>. 由于约束条件  $\mathbf{C}_{10}$  的松弛处理,获得  $\mathbf{F}$  的解后,需将  $\mathbf{F}$  中的每个指向向量归一化以满足约束条件  $\mathbf{C}_4$ . 所提的 AO-SCA 计算过程如算法 1 所示.

#### 算法 1 AO-SCA 算法

输入:  $P, G_0, p, M, \theta_{\max}, \sigma^2$ , 最大迭代次数

输出:  $\mathbf{w}_k^*, \forall k, R_{\text{sum}}$

1. 初始化  $\mathbf{w}_k^{(0)}, \mathbf{f}_m^{(0)}$  及迭代轮数  $i=1$ , 设置收敛精度  $\varepsilon$
2. 重复
3. 固定  $\mathbf{f}_m^{(i-1)}$
4. 求解问题式(31), 得到  $\mathbf{W}_k^{(i)}$
5. 对  $\mathbf{W}_k^{(i)}$  进行 EVD 得到  $\mathbf{w}_k^{(i)}$
6. 固定  $\mathbf{w}_k^{(i)}$
7. 求解问题式(40), 得到  $\mathbf{f}_m^{(i)}$
8. 计算  $\mathbf{f}_m^{(i)} = \frac{\mathbf{f}_m^{(i)}}{\|\mathbf{f}_m^{(i)}\|}, \forall m$ , 进行归一化处理
9. 计算本次迭代目标函数值式(22), 得到  $R_{\text{sum}}^{(i)}$
10. 更新  $i=i+1$
11. 直至  $|R_{\text{sum}}^{(i)} - R_{\text{sum}}^{(i-1)}| \leq \varepsilon$  或达到最大迭代次数

#### 4.4 复杂度分析

问题式(31)与问题式(40)均可使用 CVX 采用内点法求解, 问题式(31)有  $K$  个  $M \times M$  的复矩阵变量作为优化变量, 问题式(40)有  $M$  个  $3 \times 1$  的实数变量作为优化变量, 可以得到内点法解问题式(31)的复杂度为  $\mathcal{O}(K^{3.5} M^{6.5} \ln(1/\varepsilon))$ , 解问题式(40)的复杂度为  $\mathcal{O}(M^{3.5} \ln(1/\varepsilon))$ . 因此, 求解优化问题式(23)的整体复杂度为  $\mathcal{O}(L(K^{3.5} M^{6.5} + M^{3.5}) \ln(1/\varepsilon))$ , 其中  $L$  为收敛所需的迭代次数<sup>[28]</sup>.

#### 5 仿真分析

本节通过仿真验证所提方案的密钥生成性能. 假设  $K=4$  个用户分别位于  $[r_1 \sin \theta_1, 0, r_1 \cos \theta_1]^T, [r_2 \sin \theta_2, 0, r_2 \cos \theta_2]^T, [r_3 \sin \theta_3, 0, r_3 \cos \theta_3]^T, [r_4 \sin \theta_4, 0, r_4 \cos \theta_4]^T$ , 其中  $r_1=r_2=r_3=r_4=50 \text{ m}, \theta_1=\pi/3, \theta_2=\pi/6,$

$\theta_3=5\pi/12, \theta_4=\pi/12$ . 除非另有说明, 否则默认仿真参数如表 1 所示<sup>[19]</sup>.

表 1 仿真参数

参数	值	参数	值
工作频率	2.4 GHz	信号波长 $\lambda$	0.125 m
RA 数量 $M_x, M_y$	2, 2	发送功率 $P$	30 dBm
用户最小分配功率 $P_{\min}$	6 dBm	天线间距 $d$	0.062 5 m
噪声功率 $\sigma^2$	-60 dBm	最大天顶角 $\theta_{\max}$	$\pi/3$
1 m 处的路径损耗 $\beta_0$	-30 dB	方向性因子 $p$	4
路径损耗指数 $\alpha$	3	莱斯因子 $\kappa$	1

为了评估所提方案的性能, 将其与以下基准方案进行对比, 以下方案均采用问题式(31)解出的最佳约束成形向量:

- (1) 固定天线方案. 偏转角矩阵固定设置为  $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}_{2 \times M}$ , 即所有 RA 均指向  $z$  轴正方向.
- (2) 各向同性天线方案. 方向性增益设置为  $G_0=1$ , 方向性因子设置为  $p=0$ .

- (3) 随机偏转角方案. 每个 RA 的偏转角, 即  $\theta_{z,m}$  和  $\theta_{a,m}$ , 分别在  $[0, \theta_{\max}]$  和  $[0, 2\pi)$  中随机生成.

图 3 给出了各方案的密钥和速率随发送功率的变化关系. 从图 3 中可以看出, 各方案的密钥和速率均随着发送功率的增加而提高. 其中, 本文所提方案在不同发送功率下均表现出更高的密钥和速率, 显著优于其他方案. 值得注意的是, 由于随机偏转角方案未对天线指向进行优化, 因此其性能显著劣于本文所提方案, 甚至比基于固定天线的方案更差.

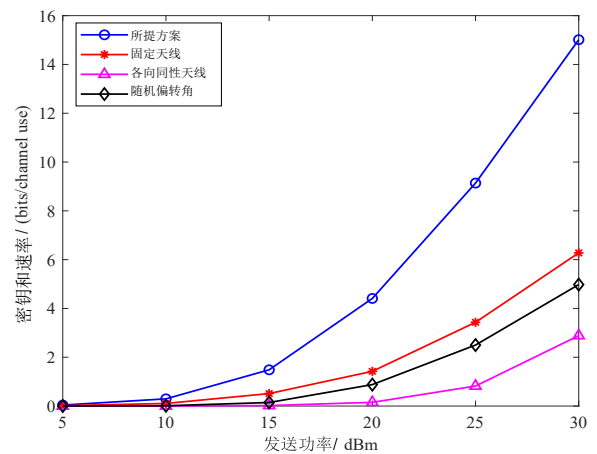


图 3 各方案的密钥和速率与发送功率的关系

图 4 给出了各方案的密钥和速率与最大天顶角的关系. 从图 4 中可以看出, 本文所提方案的密钥和速率随着最大天顶角的增大而提高. 其中, 当  $\theta_{\max} \leq 3\pi/10$  时, 本文所提方案的密钥和速率增长显著, 原因在于随着最大天顶角的增大, 系统获得了更多可利用的空间

自由度. 当  $\theta_{\max} > 3\pi/10$  时, 本文所提方案的密钥和速率趋于平缓, 原因在于 RA 的指向组合已覆盖所有用户的最优方向, 系统可利用的空间自由度达到饱和.

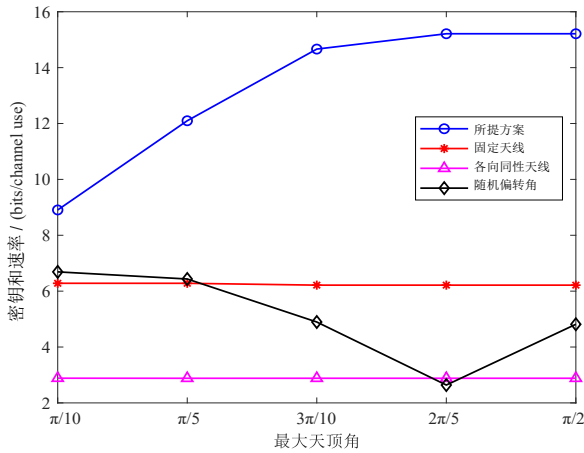


图4 各方案的密钥和速率与最大天顶角的关系

图5给出了各方案的密钥和速率随天线数量的变化情况. 从图5中可以看出, 当天线数量较小时, 本文所提方案和固定天线方案的密钥和速率均随着天线数量的增加而提高, 但随着天线数量的进一步增加, 两种方案的密钥和速率都达到饱和, 主要原因是信道硬化效应及 AP 的发送功率有限.

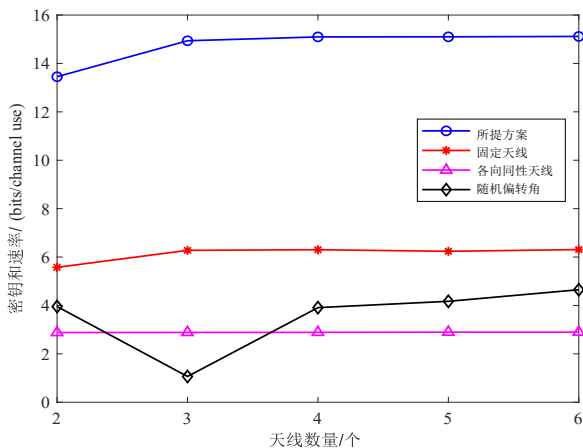


图5 各方案的密钥和速率与天线数量的关系

图6给出了各方案的密钥和速率随用户数量增加的变化趋势. 从图6中可以看出, 除了随机偏转角方案, 其他方案的密钥和速率均随着用户数量的增加而提高. 其中, 本文所提方案显著优于对比方案, 尤其是在用户数量较多的场景下, 其优势更为突出, 证明了本文所提方案在多用户环境下提高密钥生成速率的有效性.

图7给出了不同的方向性因子下密钥和速率随迭代次数增加的变化趋势. 从图7中可以看出, 对于不同

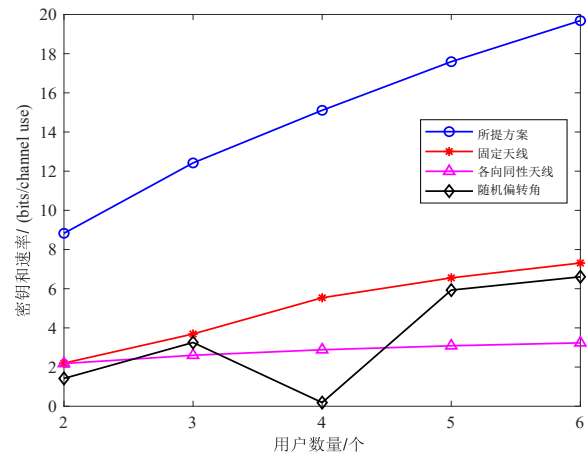


图6 各方案的密钥和速率与用户数量的关系

的方向性因子  $p$ , 密钥和速率均随着迭代次数的增加而提高, 并在 10 次迭代内收敛. 另外, 密钥和速率随着  $p$  的增大而提高, 原因在于更大的  $p$  对应更高的方向增益和更窄的波束宽度, 有利于通过 RA 在期望方向集中辐射功率.

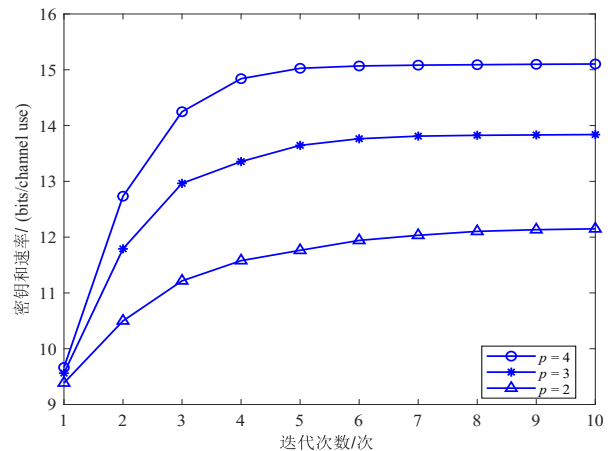


图7 不同方向性因子  $p$  下算法的收敛情况

## 6 结论

本文提出了一种 RA 辅助的多用户 MISO 系统的 PLKG 方案, 通过联合优化 AP 处的波束成形向量与 RA 的偏转角矩阵以最大化密钥和速率. 为了求解所提出的非凸问题, 设计了 AO-SCA 算法, 利用 AO 算法将其分解为波束成形向量优化子问题与偏转角矩阵优化子问题, 并利用 SDR 与 SCA 方法将非凸问题转化为凸问题, 利用 CVX 等工具进行求解. 仿真结果表明, 本文所提方案较固定天线方案、各向同性天线方案和随机偏转角方案在密钥生成上具有优势, 验证了本文所提方案的有效性.

## 参考文献

- [1] 金梁, 楼洋明, 孙小丽, 等. 6G 无线内生安全理念与构想[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(2): 344-364.  
JIN L, LOU Y M, SUN X L, et al. Concept and vision of 6G wireless endogenous safety and security[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2023, 53(2): 344-364. (in Chinese)
- [2] 林敏, 李菲, 王子宁, 等. 智能反射面辅助的大赫兹卫星通信鲁棒安全波束成形算法[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2715-2723.  
LIN M, LI F, WANG Z N, et al. Robust secure beamforming algorithm for IRS-aided terahertz satellite communication systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(10): 2715-2723. (in Chinese)
- [3] MITEV M, CHORTI A, POOR H V, et al. What physical layer security can do for 6G security[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2023, 4: 375-388.
- [4] JIAO L, WANG N, WANG P, et al. Physical layer key generation in 5G wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(5): 48-54.
- [5] 郝一诺, 钟州, 孙小丽, 等. 面向 IoT 场景的动态超表面天线密钥生成方法[J]. 通信学报, 2022, 43(12): 45-53.  
HAO Y N, ZHONG Z, SUN X L, et al. DMA-based key generation method for IoT scenario[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(12): 45-53. (in Chinese)
- [6] WAN Z, YAN M Y, HUANG K Z, et al. Pattern-reconfigurable antenna-assisted secret key generation from multipath fading channels[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2023, 24(12): 1803-1814.
- [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 H C, WANG Y Z, ZHAO D, 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] JI Z J, YEOH P L, ZHANG D Y, et al. Secret key generation for intelligent reflecting surface assisted wireless communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 1030-1034.
- [9] LI H Y, LI G Y, HU L, et al. RIS-assisted physical-layer key generation with discrete phase shift optimization[C]// 2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2023: 1-5.
- [10] HU L, LI G Y, QIAN X W, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted secret key generation in spatially correlated channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(3): 2153-2166.
- [11] LU T Y, CHEN L Q, ZHANG J Q, et al. Joint precoding and phase shift design in reconfigurable intelligent surfaces-assisted secret key generation[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2023, 18: 3251-3266.
- [12] LI G Y, SUN C, XU W, et al. On maximizing the sum secret key rate for reconfigurable intelligent surface-assisted multiuser systems[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2022, 17: 211-225.
- [13] HU L, SUN C, LI G Y, et al. Reconfigurable intelligent surface-aided secret key generation in multi-cell systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(11): 6499-6513.
- [14] WAN Z, LIU K X, CHEN Y J, et al. Resource allocation for STAR-RIS-assisted MIMO physical-layer key generation[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2024, 19: 10328-10338.
- [15] 李国权, 胡航, 王玥涛, 等. STAR-RIS 辅助的 CR-SWIPT 系统安全波束成形算法[J]. 电子学报, 2024, 52(12): 4002-4008.  
LI G Q, HU H, WANG Y T, et al. Secure beamforming algorithm for STAR-RIS assisted cognitive radio systems with SWIPT[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(12): 4002-4008. (in Chinese)
- [16] DAI Q, ZHENG B X, WANG Q Y, et al. A demo of radar sensing aided rotatable antenna for wireless communication[C]// 2025 5th International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering. Piscataway: IEEE, 2025: 205-208.
- [17] XIONG X, ZHENG B X, WU W, et al. Efficient channel estimation for rotatable antenna-enabled wireless communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(11): 3719-3723.
- [18] ZHOU C, YOU C S, ZHENG B X, et al. Rotatable antennas for integrated sensing and communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(9): 2838-2842.
- [19] DAI L, ZHENG B X, WU Q J, et al. Rotatable antenna-enabled secure wireless communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(11): 3440-3444.
- [20] 陈颖, 尹良, 孙君, 等. 大规模 MIMO 时分双工系统信道互易性研究[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(3): 56-62.  
CHEN Y, YIN L, SUN J, et al. Research on channel reciprocity of massive MIMO time division duplex system[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommuni-*

cations, 2018, 41(3): 56-62. (in Chinese)

- [21] HU X Y, WAN Z, HUANG K Z, et al. Modulated symbol-based one-time pad secure transmission scheme using physical layer keys[J]. Science China Information Sciences, 2023, 67(1): 112303.
- [22] HU X Y, JIN L, HUANG K Z, et al. Intelligent reflecting surface-assisted secret key generation with discrete phase shifts in static environment[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(9): 1867-1870.
- [23] WAN Z, CHU Z, MI D, et al. STAR-RIS-assisted physical-layer key generation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 9165-9170.
- [24] HU L, LI G Y, QIAN X W, et al. Joint transmit and reflective beamforming for RIS-assisted secret key generation[C]//GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2023: 2352-

2357.

- [25] MU X D, LIU Y W, GUO L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3083-3098.
- [26] LUO Z Q, MA W K, SO A M, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 20-34.
- [27] GRANT M, BOYD S. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming[EB/OL]. (2020-01)[2025-09-22]. <https://cvxr.com/cvx/>.
- [28] WANG K Y, SO A M, CHANG T H, et al. Outage constrained robust transmit optimization for multiuser MISO downlinks: Tractable approximations by conic optimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(21): 5690-5705.

#### 作者简介



**朱政宇** 男,1988年5月生,河南周口人. 郑州大学教授、博士生导师. 主要研究方向为无线通信和信号处理、智能反射面、物理层安全、凸优化等. 中国电子学会会员编号:E190022659S.  
E-mail: iezyzhu@zzu.edu.cn



**金梁** 男,1969年4月生,浙江上虞人. 信息工程大学教授、博士生导师. 主要研究方向为无线通信、信号处理和无线内生安全等.  
E-mail: liangjin@263.net



**柳记通** 男,2002年1月生,河南南阳人. 郑州大学硕士研究生. 主要研究方向为物理层安全.  
E-mail: iejtliu@126.com



**黄开枝** 女,1973年9月生,安徽滁州人. 信息工程大学教授、博士生导师. 主要研究方向为移动通信网络及信息安全.  
E-mail: huangkaizhi@tsinghua.org.cn



**李鑫泽** 男,1989年6月生,河南周口人. 郑州大学博士研究生. 主要研究方向为物理层安全、低空网络.  
E-mail: iexzli@126.com



**钟州** 男,1982年10月生,河南郑州人. 信息工程大学副教授、硕士生导师. 主要研究方向为智能超表面、物理层安全、阵列信号处理等.  
E-mail: zhongzhoundsc@gmail.com



**郑倍雄** 男,1990年11月生,广东饶平人. 华南理工大学副教授、博士生导师. 主要研究方向为无线通信、可转向天线、智能反射面. 中国电子学会会员编号:E190019907M.  
E-mail: bxzheng@scut.edu.cn