

智能反射面辅助的抗干扰安全通信系统鲁棒资源分配算法

席兵^{*①} 冯彦博^① 邓炳光^① 张治中^②

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 为了解决恶意干扰攻击、窃听和不完美信道状态信息造成的通信质量降低和安全性差等问题, 该文提出一种智能反射面(IRS)辅助的抗干扰安全通信系统鲁棒资源分配算法。首先, 基于合法用户的最小安全速率约束、最大发射功率约束和IRS相移约束, 在非法节点不完美信道状态信息、干扰器波束成形向量未知的情况下, 构建了一个联合优化基站的波束成形向量、人工噪声的协方差矩阵和IRS的相移矩阵的鲁棒资源分配问题。其次, 为了求解该非凸问题, 利用交替优化、Cauchy-Schwarz不等式、连续凸逼近和泰勒级数展开等方法, 将原问题转化为易于求解的凸优化问题。仿真结果表明, 与传统算法相比所提算法能有效提高系统安全性、降低功率开销、提高抗干扰裕度, 且在一定信道误差范围内能够减低约35%的保密中断概率, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 物理层安全; 智能反射面; 抗干扰; 鲁棒性; 人工噪声

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)03-0875-11

DOI: 10.11999/JEIT230343

A Robust Resource Allocation Algorithm for Intelligent Reflecting Surface-assisted Anti-jamming Secure Communication Systems

XI Bing^① FENG Yanbo^① DENG Bingguang^① ZHANG Zhizhong^②

^①(School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To address issues such as reduced communication quality and poor security caused by malicious jamming attacks, eavesdropping, and imperfect channel state information, a robust resource allocation algorithm for Intelligent Reflecting Surface(IRS)-assisted anti-jamming secure communication system is proposed in this paper. Firstly, based on the minimum security rate constraint, maximum transmit power constraint, and IRS phase shift constraint of legitimate users, a robust resource allocation problem is constructed by jointly optimizing the beamforming vectors of the base station, the covariance matrix of artificial noise, and the phase shift matrix of IRS, in the presence of imperfect channel state information of illegal nodes and unknown beamforming vectors of jammers. Secondly, to solve the problem, the original optimisation problem is transformed into an tractable convex optimisation problem using alternating optimisation, the Cauchy-Schwarz inequality, successive convex approximations and Taylor series expansions. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm can effectively enhance system security, reduce power consumption, and improve anti-jamming resilience, compared to traditional algorithms. Furthermore, within a certain range of channel errors, it can decrease the probability of confidential interruption by approximately 35%, indicating its strong robustness.

Key words: Physical layer security; Intelligent Reflecting Surface(IRS); Anti-jamming; Robustness; Artificial noise

收稿日期: 2023-04-26; 改回日期: 2023-09-10; 网络出版: 2023-09-14

*通信作者: 席兵 xibing@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61831002, 61901075)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61831002, 61901075)

1 引言

无线信道的广播性为窃听者(Eavesdropper, Eve)提供了窃听和干扰的机会^[1],从而威胁到合法用户的通信安全。为了应对上述问题,许多新颖的无线传输技术被提出,其中波束成形,人工噪声(Artificial Noise, AN)和智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)在物理层安全方面得到广泛探索和应用。其中,波束成形技术是将能量集中到很小的区域,并获得较高的增益,可以解决自由空间传播损耗较大的问题。AN辅助波束成形是发射信号时加入噪声,以略微牺牲用户接收信号质量情况下,大幅降低窃听者处的信干噪比,以此提升系统安全性^[2]。IRS是一种应用于软件控制反射重构无线传播环境的高效节能技术。具体来说,IRS由嵌入在超表面的大量低成本反射元件组成,每个元件能够独立地改变入射信号的相位或(和)幅度,从而实现被动反射波束成形^[3]。

在物理层安全增强方面,IRS辅助安全通信受到了学术界的广泛关注。文献^[4]提出了一种IRS辅助的安全节能传输算法,在合法用户和Eve的信噪比限制下,最大限度地降低发射功率。同样,利用AN可以有效加强系统安全性,因此文献^[5]提出了一种结合半定松弛法和丁克尔巴赫法的交替优化算法,通过联合优化IRS相移、波束成形向量和AN协方差矩阵,来降低用户的安全能耗。上述工作均是建立在完美信道状态信息(Channel State Information, CSI)为前提上,针对不完美CSI的问题,文献^[6]分别考虑了有界CSI误差模型和统计CSI误差模型,在最小速率、速率中断概率约束下,构建了发射功率最小化问题。进一步考虑Eve对系统的影响,文献^[7]研究了不完美CSI条件下,在Eve的最大可容忍数据速率和合法用户的最小速率要求约束下,提出了一种优化发射功率算法。为了提高系统的安全速率,文献^[8]以最大化系统和安全速率为目标,在窃听信道不完美CSI条件下,提出了一种联合优化波束成形、IRS相移和AN协方差矩阵的交替优化算法。然而,该研究中限制了对直接信道的考虑,未充分考虑恶意干扰对系统性能的影响,也没有考虑最小用户服务质量的要求。针对上述工作并没有考虑恶意干扰对系统的影响,为此文献^[9]研究了一种无人机通信系统,其中部署了IRS,以协助BS在干扰器存在的情况下传输信息到无人机,通过联合优化地面节点的发射功率、IRS的相移矩阵和无人机的飞行轨迹,最大限度地提高无人机通信的平均速率。然而文献^[9]仅考虑功率分配,忽略了波束成形、窃听、不完美CSI和使用AN等

因素的影响。与没有优化基站(Base Station, BS)波束成形向量的文献^[9]不同,文献^[10]在CSI不完善、干扰器波束成形向量不知情的情况下,通过联合设计BS的波束成形向量和IRS的相移,最大限度地提高系统的可达率。然而,文献^[10]并未使用AN技术对抗窃听者的窃听,也未充分分析不完美CSI对系统性能的影响,并且仅考虑了单用户单窃听的简单通信场景。

上述工作大部分是建立在已知完美CSI或单用户单窃听的简单情况下,但是实际通信系统更加复杂,CSI难以准确获取^[11]。为此,本文考虑了多用户多窃听、抗干扰通信的情景,综合应用了IRS、波束成形、AN等关键技术,考虑用户最小服务质量和不完美CSI,提出了一种干扰和窃听场景下的鲁棒资源分配算法,以应对复杂通信环境带来的技术挑战。本文的主要贡献总结如下:

(1) 针对恶意干扰下的多用户、多窃听IRS辅助安全通信场景,考虑了非法节点的不完美CSI和干扰器未知波束成形向量。基于有界信道误差模型,在最小安全速率,IRS相移,最大发射功率约束下,构建了一个联合优化BS波束成形向量、IRS相移矩阵、AN协方差矩阵的和最小安全速率最大化鲁棒资源分配问题。该问题由于引入了不确定参数,是一个无限维约束的非凸优化问题,难于直接求解。

(2) 由于该问题是一个难以直接求解的非凸问题,所以首先通过松弛变量将目标函数中的凸差问题转化为不等式约束,然后利用连续凸逼近和泰勒级数展开处理其非凸性;对于不完美CSI采用S-程序法和符号定性法进行求解,未知干扰波束成形利用Cauchy-Schwarz不等式转化为可求解问题;对于约束在前几轮迭代难以满足的问题,采用罚函数法解决。

(3) 通过仿真结果和现有方法比较,证明了在干扰和窃听同时存在的情况下,使用AN和IRS能有效提高系统和安全速率、降低功率开销、提高抗干扰裕度,有效抵御恶意干扰和窃听行为,并提供更可靠、安全的通信环境。此外,与传统算法相比,本文算法提前考虑信道误差的影响,能够提高系统的鲁棒性和可靠性,大幅降低用户的保密中断概率。另外,本文对选择IRS反射单元最优个数提供了有价值的参考,并探讨了和安全速率与系统鲁棒性之间的权衡关系,为实际系统的部署提供了重要的参考依据。

符号说明:小写斜体表示变量; $\text{rank}(\mathbf{Y})$, $\text{Tr}(\mathbf{Y})$, \mathbf{Y}^T , \mathbf{Y}^H 和 $\mathbf{Y}_{n,n}$ 分别表示矩阵 \mathbf{Y} 的秩、迹、

转置、共轭转置和第 n 行第 n 列的值； $\text{diag}(\mathbf{y})$ 表示以向量 \mathbf{y} 为主对角线元素的对角矩阵； $|\cdot|$ 表示复数的模运算； $\|\cdot\|_2$ 表示向量的2范数； $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的F范数； $\mathbb{C}^{M \times N}$ 表示 M 行 N 列的复数矩阵； \mathbf{I}_N 表示 N 行 N 列的单位矩阵； $\mathbf{0}_{M \times N}$ 表示 M 行 N 列的零矩阵。

2 系统模型和问题描述

如图1所示，本文研究的是IRS辅助的下行安全通信系统。其中，在恶意多天线干扰器和 M 个单天线Eve存在的情况下，多天线的BS通过直接链路和IRS反射链路向 K 个单天线用户传输信息。假设BS配备 N_t 根天线，同时IRS配备 N_r 个无源反射单元。另外，为了便于分析，系统中BS的天线、IRS的反射单元、窃听者和用户集分别定义为 $\forall n_t \in \mathcal{N}_t \triangleq \{1, 2, \dots, N_t\}$, $\forall n_r \in \mathcal{N}_r \triangleq \{1, 2, \dots, N_r\}$, $\forall m \in \mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$, $\forall k \in \mathcal{K} \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$ 。

由于严重的路径损耗，本文只考虑IRS第1次反射的信号，而忽略IRS反射两次或两次以上的信号。BS到合法用户 k 的信道增益，BS到窃听者 m 的信道增益，BS到IRS的信道增益，干扰器到合法用户 k 的信道增益，干扰器到IRS的信道增益，IRS到合法用户 k 的信道增益和IRS到窃听者 m 的信道增益分别表示为 $\mathbf{h}_k^{\text{BU}} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$, $\mathbf{h}_m^{\text{BE}} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$, $\mathbf{G}^{\text{BR}} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_r}$, $\mathbf{h}_k^{\text{JU}} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$, $\mathbf{G}^{\text{JR}} \in \mathbb{C}^{N_r \times L}$, $\mathbf{h}_k^{\text{RU}} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 和 $\mathbf{h}_m^{\text{RE}} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 。另外，BS通过导频信号来估计信道[12]，可以准确地获取所有合法用户的CSI。然而，由于基站和第三方节点之间缺乏合作，非法信道的CSI很难获得，因此，采用有界信道误差模型来表征非法信道的CSI不确定性，具体表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{h}_m^{\text{RE}} &= \bar{\mathbf{h}}_m^{\text{RE}} + \Delta \mathbf{h}_m^{\text{RE}}, \|\Delta \mathbf{h}_m^{\text{RE}}\|_2 \leq \zeta \mathbf{h}_m^{\text{RE}} \\ \mathbf{h}_m^{\text{BE}} &= \bar{\mathbf{h}}_m^{\text{BE}} + \Delta \mathbf{h}_m^{\text{BE}}, \|\Delta \mathbf{h}_m^{\text{BE}}\|_2 \leq \zeta \mathbf{h}_m^{\text{BE}} \\ \mathbf{h}_k^{\text{JU}} &= \bar{\mathbf{h}}_k^{\text{JU}} + \Delta \mathbf{h}_k^{\text{JU}}, \|\Delta \mathbf{h}_k^{\text{JU}}\|_2 \leq \zeta \mathbf{h}_k^{\text{JU}} \\ \mathbf{G}^{\text{JR}} &= \bar{\mathbf{G}}^{\text{JR}} + \Delta \mathbf{G}^{\text{JR}}, \|\Delta \mathbf{G}^{\text{JR}}\|_F \leq \zeta \mathbf{G}^{\text{JR}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中， $\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{RE}}$, $\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{BE}}$, $\bar{\mathbf{h}}_k^{\text{JU}}$ 和 $\bar{\mathbf{G}}^{\text{JR}}$ 表示估计的信道增益， $\Delta \mathbf{h}_m^{\text{RE}}$, $\Delta \mathbf{h}_m^{\text{BE}}$, $\Delta \mathbf{h}_k^{\text{JU}}$ 和 $\Delta \mathbf{G}^{\text{JR}}$ 表示信道增益估计误差， $\zeta \mathbf{h}_m^{\text{RE}}$, $\zeta \mathbf{h}_m^{\text{BE}}$, $\zeta \mathbf{h}_k^{\text{JU}}$ 和 $\zeta \mathbf{G}^{\text{JR}}$ 表示不确定性参数上界。

BS在同一频带内同时给每个合法用户发送 K 个独立的数据流，此外假设 M 个窃听者可以独立地窃听任何数据流[13]。为了防止用户信息被窃听，在发射信号中加入AN信号，则发射信号 \mathbf{x} 表示为

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{T,k} \mathbf{s}_{T,k} + \mathbf{z} \quad (2)$$

其中， $\mathbf{w}_{T,k} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示BS发送给合法用户 k 的波束成形向量， $\mathbf{s}_{T,k}$ 表示BS发送给合法用户 k 的机密信息，且满足 $\mathbb{E}\{|\mathbf{s}_{T,k}|^2\} = 1$ ， $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示AN信号，且满足 $\mathbf{z} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{Z})$ ， $\mathbf{Z} \succcurlyeq 0$ 是AN的协方差矩阵[5]。定义IRS的相移矩阵表示为 $\Theta = \text{diag}(\mathbf{v}^H)$ ，其中， $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_{N_r}]^H$ ， $v_n = \phi_n e^{j\theta_n}$ ， $\phi_n \in [0, 1]$ 和 $\theta_n \in [0, 2\pi)$ 分别表示IRS第 n 个反射元件的振幅系数和相移。为了便于分析，与现有工作类似[14]，本文设置 $\phi_n = 1$, $\forall n \in \mathcal{N}_r$ 。因此，用户 k 的接收信号可以表示为

$$y_k = (\mathbf{h}_k^{\text{U}})^H \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{T,k} \mathbf{s}_{T,k} + \mathbf{z} \right) + (\mathbf{h}_k^{\text{J}})^H \mathbf{w}_J \mathbf{s}_J + n_k \quad (3)$$

其中， $\mathbf{h}_k^{\text{U}} = \mathbf{h}_k^{\text{BU}} + (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \Theta^H \mathbf{h}_k^{\text{RU}}$, $\mathbf{h}_k^{\text{J}} = \mathbf{h}_k^{\text{JU}} + (\mathbf{G}^{\text{JR}})^H \Theta^H \mathbf{h}_k^{\text{RU}}$, $\mathbf{w}_J \mathbf{s}_J \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 是干扰器的信号，且 $\mathbb{E}\{|\mathbf{s}_{J,k}|^2\} = 1$,

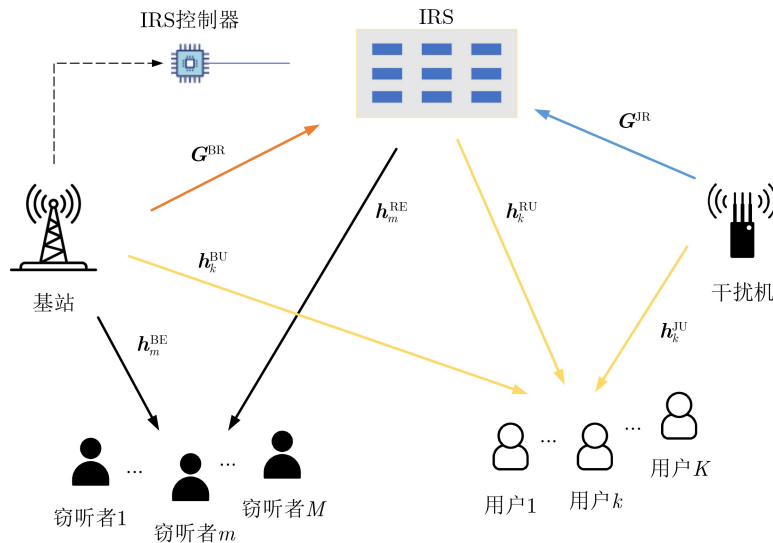


图1 系统模型

BS不能获得此信号, n_k 为用户 k 处均值为零方差为 δ_k^2 的加性高斯白噪声。此外, 考虑到干扰器和窃听者之间的潜在合作, 窃听者接收到的干扰信号可以消除^[10], 则窃听者 m 的接收信号为

$$y_{e,m} = (\mathbf{h}_m^E)^H \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{T,k} s_{T,k} + \mathbf{z} \right) + n_{e,m} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{h}_m^E = \mathbf{h}_m^{BE} + (\mathbf{G}^{BR})^H \Theta^H \mathbf{h}_m^{RE}$, $n_{e,m}$ 为窃听者 m 处均值为零方差为 $\delta_{e,m}^2$ 的加性高斯白噪声。

根据式(3), 用户 k 的信干噪比可示为

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^U)^H \mathbf{w}_{T,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |(\mathbf{h}_k^U)^H \mathbf{w}_{T,i}|^2 + (\mathbf{h}_k^U)^H \mathbf{Z} \mathbf{h}_k^U + J_k + \delta_k^2} \quad (5)$$

其中, $J_k = |(\mathbf{h}_k^J)^H \mathbf{w}_J|^2$ 表示用户 k 收到干扰器的干扰功率, 则用户 k 的速率可以表示为 $R_k = \log_2(1 + \gamma_k)$ 。

如果窃听者 m 窃听第 k 条机密消息, 则窃听者 m 收到的第 k 条消息的信干噪比可表示为

$$\gamma_{k,m}^E = \frac{|(\mathbf{h}_m^E)^H \mathbf{w}_{T,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |(\mathbf{h}_m^E)^H \mathbf{w}_{T,i}|^2 + (\mathbf{h}_m^E)^H \mathbf{Z} \mathbf{h}_m^E + \delta_{e,m}^2} \quad (6)$$

则窃听者 m 窃听第 k 个用户的速率表示为 $R_{k,m}^E = \log_2(1 + \gamma_{k,m}^E)$ 。因此, 用户 k 的安全速率可以表示为 $R_k^S = [R_k - \max_{m \in \mathcal{M}} \{R_{k,m}^E\}]^+$ 。

在BS无法准确获取非法节点CSI且不知道干扰发射器的波束成形向量的情况下, 考虑最坏情况下的安全通信, 通过联合优化BS的波束成形向量 $\{\mathbf{w}_k\}_{k \in \mathcal{K}}$, AN协方差矩阵 \mathbf{Z} 和IRS的相移 \mathbf{v} 来最大化系统和安全速率, 以抵抗窃听和干扰攻击, 从而保证系统安全通信, 则优化问题表述为

$$\left. \begin{aligned} \text{(P1): } & \max_{\mathbf{w}_k, \mathbf{Z}, \mathbf{v}} \sum_{k=1}^K R_k^S \\ \text{s.t. C1: } & R_k - \max_{m \in \mathcal{M}} \{R_{k,m}^E\} \geq R_k^{\min}, \forall k \in \mathcal{K} \\ \text{C2: } & \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_{T,k}\|^2 + \text{Tr}(\mathbf{Z}) \leq P^{\max} \\ \text{C3: } & |v_n| = 1, \forall n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, C1是合法用户的服务质量约束, R_k^{\min} 是用户 k 的最小速率; C2为BS处最大发射功率约束, P^{\max} 为BS最大发射功率; C3为IRS反射元件的相移约束。

3 交替优化算法求解

本节考虑有界信道误差模型下的鲁棒波束成形

设计。定义 $\mathbf{H}_m^E = \mathbf{h}_m^E (\mathbf{h}_m^E)^H$, $\mathbf{H}_k^U = \mathbf{h}_k^U (\mathbf{h}_k^U)^H$, $\mathbf{W}_k = \mathbf{w}_{T,k} \mathbf{w}_{T,k}^H$ 。由于目标函数的非凸性以及优化变量的耦合性, 使得(P1)求解难度较大。因此, 为了解决该问题, 提出一种基于交替优化的算法, 将该问题分解为两个子问题, 即问题1: 固定 \mathbf{v} 求解出 $\{\mathbf{W}_k\}$ 和 \mathbf{Z} ; 问题2: 用问题1解出的 $\{\mathbf{W}_k\}$ 和 \mathbf{Z} , 求解 \mathbf{v} 。然后利用连续凸逼近和泰勒级数展开处理凸差问题, 利用S-程序法和符号定性法处理由于不完美CSI导致的无限维约束问题; 对于不确定的干扰器波束成形向量利用Cauchy-Schwarz处理。

3.1 固定 \mathbf{v} 求解 $\{\mathbf{W}_k\}$ 和 \mathbf{Z}

为了解决子问题1, 首先引入松弛变量 $\sigma_k \geq 0$, 将目标函数和C1约束中的 γ_k 重新表示为

$$\bar{\gamma}_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^U)^H \mathbf{w}_{T,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |(\mathbf{h}_k^U)^H \mathbf{w}_{T,i}|^2 + (\mathbf{h}_k^U)^H \mathbf{Z} \mathbf{h}_k^U + \sigma_k + \delta_k^2} \quad (8)$$

其中, $J_k = |(\mathbf{h}_k^J)^H \mathbf{w}_J|^2 \leq \sigma_k$ 。由于干扰器的波束成形向量 \mathbf{w}_J 未知, 为了使问题在实际应用中可行, 利用Cauchy-Schwarz不等式得到 J_k 的上界, 即 $|(\mathbf{h}_k^J)^H \mathbf{w}_J|^2 \leq P_J \|(\mathbf{h}_k^J)^H\|^2$, 其中 P_J 表示功率 $\|\mathbf{w}_J\|^2$, 利用信号强度和信道增益可以得到^[15]。然而由于干扰器的不完美CSI, 无法准确获得 P_J , 因此采取 $|P_J - \bar{P}_J|/P_J \leq \xi_P$ 来表示 $\|\mathbf{w}_J\|^2$ 的估计误差, 其中 \bar{P}_J 表示功率的估计值。通过变换可以得到 $\bar{P}_J/(\xi_P + 1) \leq P_J \leq \bar{P}_J/(1 - \xi_P)$, 所以 $\|(\mathbf{h}_k^J)^H\|^2 \leq \bar{\sigma}_k = \sigma_k(1 - \xi_P)/\bar{P}_J \leq \sigma_k/P_J$ 。为了处理不完美CSI, 利用Schur补定理^[16]将其等价转化为式(9)

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_k & (\mathbf{h}_k^{JU})^H + (\mathbf{h}_k^{RU})^H \Theta \mathbf{G}^{JR} \\ ((\mathbf{h}_k^{JU})^H + (\mathbf{h}_k^{RU})^H \Theta \mathbf{G}^{JR})^H & \mathbf{I}_L \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (9)$$

然后, 将 $\mathbf{h}_k^{JU} = \bar{\mathbf{h}}_k^{JU} + \Delta \mathbf{h}_k^{JU}$, $\mathbf{G}^{JR} = \bar{\mathbf{G}}^{JR} + \Delta \mathbf{G}^{JR}$ 代入式(9)中进行变换后可以得到

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_k & (\bar{\mathbf{h}}_k^{JU})^H + (\mathbf{h}_k^{RU})^H \Theta \bar{\mathbf{G}}^{JR} \\ \bar{\mathbf{h}}_k^{JU} + (\bar{\mathbf{G}}^{JR})^H \Theta^H \mathbf{h}_k^{RU} & \mathbf{I}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times L} \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} \Delta \mathbf{h}_k^{JU} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0}_{1 \times L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{0}_{L \times 1} \end{bmatrix} \cdot (\Delta \mathbf{h}_k^{JU})^H \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{L \times 1} & \mathbf{I}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times L} \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} (\Delta \mathbf{G}^{JR})^H \begin{bmatrix} \Theta^H \mathbf{h}_k^{RU} & \mathbf{0}_{N_r \times L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathbf{h}_k^{RU})^H \Theta \\ \mathbf{0}_{L \times N_r} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{G}^{JR} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{L \times 1} & \mathbf{I}_L \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (10)$$

由于式(10)的多个不确定参数, 因此引入引理1处理。

引理1 (符号定性法)^[17] 定义矩阵 $\mathbf{B} = \mathbf{B}^H$ 和 $\{\mathbf{C}_i, \mathbf{D}_i\}_{i=1}^P$, 当且仅当 $\forall i, u_i \geq 0$ 时, 线性矩阵不等式: $\mathbf{B} \succcurlyeq \sum_{i=1}^P (\mathbf{C}_i^H \mathbf{X}_i \mathbf{D}_i + \mathbf{D}_i^H \mathbf{X}_i^H \mathbf{C}_i), \forall i, \|\mathbf{X}_i\| \leq \zeta_i$ 成立, 则有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} - \sum_{i=1}^P u_i \mathbf{D}_i^H \mathbf{D}_i & -\zeta_1 \mathbf{C}_1^H & \cdots & -\zeta_P \mathbf{C}_P^H \\ -\zeta_1 \mathbf{C}_1 & u_1 \mathbf{I} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\zeta_P \mathbf{C}_P & \mathbf{0} & \cdots & u_P \mathbf{I} \end{bmatrix} \succcurlyeq \mathbf{0} \quad (11)$$

因此, 式(10)可以转化为式(12)

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_k - u_{k,1} - u_{k,2} (\mathbf{h}_k^{\text{RU}})^H \mathbf{h}_k^{\text{RU}} & (\bar{\mathbf{h}}_k^{\text{JU}})^H + (\mathbf{h}_k^{\text{RU}})^H \boldsymbol{\Theta} \bar{\mathbf{G}}^{\text{JR}} & \mathbf{0}_{1 \times L} & \mathbf{0}_{1 \times L} \\ \bar{\mathbf{h}}_k^{\text{JU}} + (\bar{\mathbf{G}}^{\text{JR}})^H \boldsymbol{\Theta}^H \mathbf{h}_k^{\text{RU}} & \mathbf{I}_L & \zeta_{\mathbf{h}_k^{\text{JU}}} \mathbf{I}_L & \zeta_{\mathbf{G}^{\text{JR}}} \mathbf{I}_L \\ \mathbf{0}_{L \times 1} & \zeta_{\mathbf{h}_k^{\text{JU}}} \mathbf{I}_L & u_{k,1} \mathbf{I}_L & \mathbf{0}_{L \times L} \\ \mathbf{0}_{L \times 1} & \zeta_{\mathbf{G}^{\text{JR}}} \mathbf{I}_L & \mathbf{0}_{L \times L} & u_{k,2} \mathbf{I}_L \end{bmatrix} \succcurlyeq \mathbf{0} \quad (12)$$

其中, $u_{k,1} \geq 0, u_{k,2} \geq 0$ 是引入的松弛变量, 定义 $\mathbf{u} = \{u_{k,1}, u_{k,2}, \sigma_k | \forall k\}$. 为了处理目标函数和C1中速率的非凸性, 考虑使用变量松弛为

$$\frac{\eta_k}{\varphi_k} \geq 2^{r_k} - 1 \quad (13)$$

$$\frac{\beta_{k,m}}{\alpha_{k,m}} \leq 2^{\tau_{k,m}} - 1 \quad (14)$$

$$(\mathbf{h}_k^{\text{U}})^H \mathbf{W}_k \mathbf{h}_k^{\text{U}} \geq \eta_k \quad (15)$$

$$(\mathbf{h}_k^{\text{U}})^H \left(\mathbf{Z} + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i \right) \mathbf{h}_k^{\text{U}} + \sigma_k + \delta_k^2 \leq \varphi_k \quad (16)$$

$$(\mathbf{h}_m^{\text{E}})^H \mathbf{W}_k \mathbf{h}_m^{\text{E}} \leq \beta_{k,m} \quad (17)$$

$$(\mathbf{h}_m^{\text{E}})^H \left(\mathbf{Z} + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i \right) \mathbf{h}_m^{\text{E}} + \delta_{e,m}^2 \geq \alpha_{k,m} \quad (18)$$

其中, $\varphi_k, \eta_k, r_k, \beta_{k,m}, \alpha_{k,m}, \tau_{k,m}$ 是松弛变量, 然而式(13)、式(14)仍然是非凸约束, 为了解决式(13)和式(14)的非凸性, 利用逐次凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)和泰勒级数展开^[18], 式(13)、式(14)近似为

$$\left. \begin{aligned} \eta_k &\geq e^{y_k^1}, y_k^1 - y_k^2 \geq y_k^3 \\ \varphi_k &\leq e^{(y_k^2)^{(n)}} \left(y_k^2 - (y_k^2)^{(n)} + 1 \right) \\ 2^{r_k} - 1 &\leq e^{(y_k^3)^{(n)}} \left(y_k^3 - (y_k^3)^{(n)} + 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{k,m} &\geq e^{\chi_{k,m}^2}, \chi_{k,m}^1 - \chi_{k,m}^2 \leq \chi_{k,m}^3 \\ \beta_{k,m} &\leq e^{(\chi_{k,m}^1)^{(n)}} \left(\chi_{k,m}^1 - (\chi_{k,m}^1)^{(n)} + 1 \right) \\ 2^{(\tau_{k,m})^{(n)}} &\left[\left(\tau_{k,m} - (\tau_{k,m})^{(n)} \right) \ln 2 + 1 \right] - 1 \geq e^{\chi_{k,m}^3} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

其中, $\chi_{k,m}^1, \chi_{k,m}^2, \chi_{k,m}^3, y_k^1, y_k^2, y_k^3$ 是松弛变量,

$(y_k^2)^{(n)}, (y_k^3)^{(n)}, (\tau_{k,m})^{(n)}, (\chi_{k,m}^1)^{(n)}$ 是 $y_k^2, y_k^3, \tau_{k,m}, \chi_{k,m}^1$ 第 n 次迭代的值。

由于信道不确定性的影响, 式(17)、式(18)属于无限维优化问题, 关键的挑战是将其转化为确定性问题。因此, 对于式(17), 首先将其展开为

$$\left. \begin{aligned} & \left((\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{BE}})^H + (\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{RE}})^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}^{\text{BR}} \right) (\mathbf{W}_k) \\ & \left(\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{BE}} + (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \boldsymbol{\Theta}^H \bar{\mathbf{h}}_m^{\text{RE}} \right) \\ & + 2\text{Re} \left((\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{BE}})^H + (\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{RE}})^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}^{\text{BR}} \right) (\mathbf{W}_k) \\ & \left(\Delta \mathbf{h}_m^{\text{BE}} + (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \boldsymbol{\Theta}^H \Delta \mathbf{h}_m^{\text{RE}} \right) \\ & + \left((\Delta \mathbf{h}_m^{\text{BE}})^H + (\Delta \mathbf{h}_m^{\text{RE}})^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}^{\text{BR}} \right) (\mathbf{W}_k) \\ & \left(\Delta \mathbf{h}_m^{\text{BE}} + (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \boldsymbol{\Theta}^H \Delta \mathbf{h}_m^{\text{RE}} \right) \\ & + \delta_{e,m}^2 \end{aligned} \right\} \leq \beta_{k,m} \quad (21)$$

再将式(21)中信道估计向量和信道估计误差向量单独分离, 改写为式(22)

$$\bar{\mathbf{h}}_m^H \boldsymbol{\Phi}_1 \mathbf{h}_m + 2\text{Re}(\bar{\mathbf{h}}_m^H \boldsymbol{\Phi}_1 \Delta \mathbf{h}_m) + \Delta \mathbf{h}_m^H \boldsymbol{\Phi}_1 \Delta \mathbf{h}_m + \delta_{e,m}^2 \leq \beta_{k,m} \quad (22)$$

其中, $\bar{\mathbf{h}}_m^H = [(\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{BE}})^H \ (\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{RE}})^H]$, $\Delta \mathbf{h}_m^H = [(\Delta \mathbf{h}_m^{\text{BE}})^H \ (\Delta \mathbf{h}_m^{\text{RE}})^H]$

$$\boldsymbol{\Phi}_k^1 = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_k & \mathbf{W}_k (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \boldsymbol{\Theta}^H \\ \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{W}_k & \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{W}_k (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \boldsymbol{\Theta}^H \end{bmatrix} \quad (23)$$

然后用引理2来处理式(22)中的CSI不确定性。具体来说, 式(22)中每个用户对应的约束可以通过设置引理2中的参数进行重铸。

引理2 (S-程序法)^[19] 定义变量 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ 的2次函数: $f_i(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^H \mathbf{A}_i \mathbf{x} + 2\text{Re}\{\mathbf{a}_i^H \mathbf{x}\} + \omega_i, i = 0, 1, \dots, P$, 其中 $\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i^H$. 当且仅当 $\forall i, \lambda \geq 0$ 时, $\{f_i(\mathbf{x}) \geq 0\}_{i=1}^P \Rightarrow f_0(\mathbf{x}) \geq 0$ 成立, 则有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{a}_0^H & \omega_0 \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^P \lambda_i \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{a}_i \\ \mathbf{a}_i^H & \omega_i \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (24)$$

对于式(22), 取 $f_1(\Delta \mathbf{h}_m)_i = \Delta \mathbf{h}_m^H \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{h}_m + 2\text{Re}(\mathbf{a}_i^H \Delta \mathbf{h}_m) + \omega_i$, $P=1$, $\mathbf{A}_1 = -\mathbf{I}$, $\mathbf{a}_1 = 0$, $\omega_1 = \zeta_{\Delta \mathbf{h}_m}^2$, $\mathbf{A}_0 = -\Phi_k^1$, $\mathbf{a}_0 = -(\Phi_k^1)^H \bar{\mathbf{h}}_m$, $\omega_0 = -(\bar{\mathbf{h}}_m^H \Phi_k^1 \bar{\mathbf{h}}_m + \delta_{e,m}^2 - \beta_{k,m})$ 。

此时可以得到

$$\begin{bmatrix} \lambda_{k,m} \mathbf{I}_{N_r+N_t} - \Phi_k^1 & -(\Phi_k^1)^H \bar{\mathbf{h}}_m \\ -\bar{\mathbf{h}}_m^H \Phi_k^1 & -\lambda_{k,m} \zeta_{\Delta \mathbf{h}_m}^2 - (\bar{\mathbf{h}}_m^H \Phi_k^1 \bar{\mathbf{h}}_m - \beta_{k,m}) \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (25)$$

其中, $\lambda_{k,m} \geq 0$ 是引入的松弛变量, $\zeta_{\Delta \mathbf{h}_m} = \zeta_{\mathbf{h}_m^{\text{BE}}} + \zeta_{\mathbf{h}_m^{\text{RE}}}$ 。同理, 式(18)可以表示为式(26)

$$\begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_{k,m} \mathbf{I}_{N_r+N_t} + \Phi_k^2 & (\Phi_k^2)^H \bar{\mathbf{h}}_m \\ \bar{\mathbf{h}}_m^H \Phi_k^2 & -\tilde{\lambda}_{k,m} \zeta_{\Delta \mathbf{h}_m}^2 + (\bar{\mathbf{h}}_m^H \Phi_k^2 \bar{\mathbf{h}}_m + \delta_{e,m}^2 - \alpha_{k,m}) \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (26)$$

其中, $\tilde{\lambda}_{k,m} \geq 0$ 是引入的松弛变量

$$\Phi_k^2 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i + \mathbf{Z} & \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i + \mathbf{Z} \right) (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \Theta^H \\ \Theta \mathbf{G}^{\text{BR}} \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i + \mathbf{Z} \right) & \Theta \mathbf{G}^{\text{BR}} \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i + \mathbf{Z} \right) (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \Theta^H \end{bmatrix} \quad (27)$$

定义 $\Lambda \triangleq \left\{ \chi_{k,m}^1, \chi_{k,m}^2, \chi_{k,m}^3, y_k^1, y_k^2, y_k^3, \alpha_{k,m}, \beta_{k,m}, \eta_k, \varphi_k, \tau_{k,m}, r_k, \lambda_{k,m}, \tilde{\lambda}_{k,m} | \forall k, m \right\}$, 则将问题(P1)重新表述为

$$\left. \begin{aligned} \text{(P2): } & \max_{\mathbf{W}_k, \mathbf{Z}, \Lambda, \mathbf{u}} \sum_{k=1}^K \bar{R}_k^{\text{S}} \\ \text{s.t. } & \bar{\text{C1}}: r_k - \max_{m \in \mathcal{M}} \{\tau_{k,m}\} \geq R_k^{\text{min}} \\ & \bar{\text{C2}}: \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{W}_k) + \text{Tr}(\mathbf{Z}) \leq P^{\text{max}} \\ & \text{C4: } \mathbf{W}_k \succeq 0 \\ & \text{C5: } \text{rank}(\mathbf{W}_k) = 1, \text{式(12), 式(15),} \\ & \text{式(16), 式(19), 式(20), 式(25), 式(26)} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

其中, $\bar{R}_k^{\text{S}} = [r_k - \max_{m \in \mathcal{M}} \{\tau_{k,m}\}]^+$ 。对于(P2)这个优化问题, 除了秩1约束C5外, 其余约束和目标函数均为凸。对于约束C5可以使用SDR来处理。当 $\text{rank}(\mathbf{W}_k) = 1$, 应用特征值分解方法可获得最优 $\mathbf{w}_{\text{T},k}$ $\mathbf{w}_{\text{T},k}^H$ 。当 $\text{rank}(\mathbf{W}_k) > 1$ 时, 可以使用高斯随机化方法^[20]。此时的问题是一个凸SDP问题, 可以通过CVX工具箱求解, 但是对于 $\bar{\text{C1}}$ 约束, 因为松弛变量的引入, 很难在前几轮迭代时满足约束条件 $\bar{\text{C1}}$, 所以根据罚函数法的框架, 在最小安全速率约束上使用松弛变量 ψ 将问题(P2)重新表述为

$$\left. \begin{aligned} \text{(P3): } & \max_{\mathbf{W}_k, \mathbf{Z}, \Lambda, \mathbf{u}, \psi} \sum_{k=1}^K \bar{R}_k^{\text{S}} - \psi \rho_1 \\ \text{s.t. } & \bar{\text{C1}}: \max(R_k^{\text{min}} - r_k + \max_{m \in \mathcal{M}} \{\tau_{k,m}\}, 0) < \psi \\ & \text{式(12), 式(15), 式(16), 式(19), 式(20),} \\ & \text{式(25), 式(26), 约束 } \bar{\text{C2}}, \text{C4, C5} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

其中, ρ_1 是惩罚因子, 当 ρ_1 足够大时, 会优先满足最小安全速率约束, 当迭代结束时, ψ 小于某个趋近于0的正值, 说明能够满足约束, 反之则说明当前可用资源下无法满足最小安全速率约束。

3.2 固定 $\{\mathbf{W}_k\}$ 和 \mathbf{Z} 求解 ψ

为了分离式(15)和式(16)中的相移矩阵, 使用类似式(21)–式(23)的方法将式(15)–式(16)重新表示为 $\mathbf{h}_k^H \Phi_k^1 \mathbf{h}_k \geq \eta_k$ 和 $\mathbf{h}_k^H \Phi_k^2 \mathbf{h}_k + \gamma_k + \delta_k^2 \leq \varphi_k$, 其中 $\mathbf{h}_k^H = [(\mathbf{h}_k^{\text{BU}})^H \ (\mathbf{h}_k^{\text{RU}})^H]$ 。

对于 Φ_k^1, Φ_k^2 中的非凸项, 采用奇异值分解^[21] $\mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{W}_k (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H$ 和 $\mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{Z} (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H$ 得到

$$\mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{W}_k (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H = \sum_j \mathbf{s}_{k,j} \mathbf{q}_{k,j}^H \quad (30)$$

$$\mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{Z} (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H = \sum_j \bar{\mathbf{s}}_j \bar{\mathbf{q}}_j^H \quad (31)$$

则有

$$\Theta \mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{W}_k (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \Theta^H = \sum_j \mathbf{s}_{k,j} \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}^H \mathbf{Q}_{k,j}^H \quad (32)$$

$$\Theta \mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{Z} (\mathbf{G}^{\text{BR}})^H \Theta^H = \sum_j \bar{\mathbf{S}}_j \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}^H \bar{\mathbf{Q}}_j^H \quad (33)$$

其中, $\mathbf{s}_{k,j} = [\text{diag}(\mathbf{s}_{k,j}) \ \mathbf{0}_{N_r \times 1}]$, $\mathbf{Q}_{k,j} = [\text{diag}(\mathbf{q}_{k,j}) \ \mathbf{0}_{N_r \times 1}]$, $\bar{\mathbf{s}}_{k,j} = [\text{diag}(\bar{\mathbf{s}}_{k,j}) \ \mathbf{0}_{N_r \times 1}]$, $\bar{\mathbf{Q}}_{k,j} = [\text{diag}(\bar{\mathbf{q}}_{k,j}) \ \mathbf{0}_{N_r \times 1}]$, $\bar{\mathbf{v}} = [\mathbf{v}; 1]$, $\mathbf{V} = \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}^H$ 。同时将 Θ 用 \mathbf{V} 表示, 即 $\Theta = \text{diag}(\mathbf{V}_{1:N_r, N_r+1})$ 其中 $\mathbf{V}_{1:N_r, N_r+1} = [\mathbf{V}_{1, N_r+1} \ \mathbf{V}_{2: N_r, N_r+1} \cdots \ \mathbf{V}_{N_r, N_r+1}]^H$, $|\mathbf{V}_{n_r, N_r+1}|^2 = 1$, $n_r = 1, 2, \dots, N_r$, 则将 Φ_k^1 和 Φ_k^2 重新表示为 $\bar{\Phi}_k^1, \bar{\Phi}_k^2$

$$\bar{\Phi}_k^1 = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_k & \mathbf{W}_k (\mathbf{G}^{\text{BR}})^{\text{H}} \text{diag}(\mathbf{V}_{N_r+1,1:N_r}) \\ \text{diag}(\mathbf{V}_{N_r+1,1:N_r})^{\text{H}} \mathbf{G}^{\text{BR}} \mathbf{W}_k & \sum_j \mathbf{s}_{k,j} \mathbf{V} \mathbf{q}_{k,j}^{\text{H}} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\bar{\Phi}_k^2 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i + \mathbf{Z} & \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i + \mathbf{Z} \right) (\mathbf{G}^{\text{BR}})^{\text{H}} \text{diag}(\mathbf{V}_{N_r+1,1:N_r}) \\ \text{diag}(\mathbf{V}_{N_r+1,1:N_r})^{\text{H}} \mathbf{G}^{\text{BR}} \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i + \mathbf{Z} \right) & \sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_j \mathbf{s}_{i,j} \mathbf{V} \mathbf{q}_{i,j}^{\text{H}} + \sum_j \bar{\mathbf{s}}_j \mathbf{V} \bar{\mathbf{q}}_j^{\text{H}} \end{bmatrix} \quad (35)$$

此时子问题2可以表述为

$$\left. \begin{aligned} \text{(P4): } \max_{\mathbf{V}, \mathbf{A}, \mathbf{u}, \psi} \sum_{k=1}^K \bar{R}_k^{\text{S}} - \psi \rho_1 \\ \text{s.t. C8: } \mathbf{V}_{n_r, n_r} = 1, \mathbf{V} \succcurlyeq 0, n_r = 1, 2, \dots, N_r + 1 \\ \text{C9: rank}(\mathbf{V}) = 1 \\ \bar{\text{C3:}} |\mathbf{V}_{n_r, N_r+1}|^2 = 1, n_r = 1, 2, \dots, N_r \\ \text{式(12), 式(15), 式(16), 式(19),} \\ \text{式(20), 式(25), 式(26), 约束}\tilde{\text{C1}} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

对于上述问题中的C9约束采用与子问题1相同的SDR方法处理。对于 $\bar{\text{C3}}$ 采用罚函数法，则 $|\mathbf{V}_{n_r, N_r+1}|^2 = 1, n_r = 1, 2, \dots, N_r$ 的等价形式为 $1 \leq |\mathbf{V}_{n_r, N_r+1}|^2 \leq 1, n_r = 1, 2, \dots, N_r$ ，根据1阶泰勒不等式，非凸部分 $1 \leq |\mathbf{V}_{n_r, N_r+1}|^2, n_r = 1, 2, \dots, N_r$ 可以近似为 $|\mathbf{v}_{n_r}^{(n)}|^2 - 2\text{Re}\{\mathbf{V}_{n_r, N_r+1} \mathbf{v}_{n_r}^{(n)}\} \leq -1, n_r = 1, 2, \dots, N_r$ ，其中 $\mathbf{v}^{(n)}$ 表示第 n 次迭代中获得的最优解。根据罚函数法的框架，在单位模量约束的等价约束上使用松弛变量 $\mathbf{L} = [l_1, l_2, \dots, l_{2N_r}]^{\text{T}}$ ，将问题(P4)重新表述为

$$\left. \begin{aligned} \text{(P5): } \max_{\mathbf{V}, \mathbf{A}, \mathbf{u}, \psi, \mathbf{L}} \sum_{k=1}^K \bar{R}_k^{\text{S}} - \psi \rho_1 - \rho_2 \|\mathbf{L}\|_1 \\ \text{s.t. C10: } |\mathbf{V}_{n_r, N_r+1}|^2 \leq 1 + l_{n_r+N_r}, l_{n_r+N_r} \geq 0, \\ n_r = 1, 2, \dots, N_r \\ \text{C11: } |\mathbf{v}_{n_r}^{(n)}|^2 - 2\text{Re}\{\mathbf{V}_{n_r, N_r+1} \mathbf{v}_{n_r}^{(n)}\} \leq l_{n_r} - 1, \\ l_{n_r} \geq 0, n_r = 1, 2, \dots, N_r \\ \text{式(12), 式(15), 式(16), 式(19), 式(20),} \\ \text{式(25), 式(26), 约束}\tilde{\text{C1}}, \text{C8, C9,} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

其中， ρ_2 是惩罚因子，问题(P5)是个凸SDP问题，可以使用CVX工具箱求解。因此，可设计如[算法1](#)所示基于迭代的和安全速率最大化算法。

4 复杂度分析

为了充分体现算法性能，进行如下复杂度分析。针对2阶锥(Second Order Cone, SOC)和线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)凸优化问题的复杂度可以表示为^[22]

$$\left(\sum_{i=1}^{\bar{x}} c_i + 2e \right)^{1/2} \cdot \left(n \sum_{i=1}^{\bar{x}} c_i^3 + n^2 \sum_{i=1}^{\bar{x}} c_i^2 + n \sum_{i=1}^{\bar{y}} e_i^2 + n^3 \right) \quad (38)$$

其中， \bar{x} 表示LMI的个数， c_i 表示第 i 个约束对应的维数， \bar{y} 表示SOC约束的个数， e 表示SOC约束对应维数， n 是需要优化的变量个数。因此问题(P3)的复杂度可表示为式(39)

$$\begin{aligned} & (8K + 6KM + (K + 2)N_t + K(3L + 1) \\ & + 2KM(N_r + N_t + 1))^{1/2} \\ & \cdot ((8K + 6KM + (K + 2)N_t^3 + K(3L + 1)^3 \\ & + 2KM(N_r + N_t + 1)^3)n_1 \\ & + (8K + 6KM + (K + 2)N_t^2 + K(3L + 1)^2 \\ & + 2KM(N_r + N_t + 1)^2)n_1^2 + n_1^3) \end{aligned} \quad (39)$$

其中， $n_1 = KN_t^2 + 8KM + 10K + N_t^2$ 。问题(P5)的复杂度可以表示为式(40)

$$\begin{aligned} & (8K + 6KM + 4N_r + (N_r + 1) + K(3L + 1) \\ & + 2KM(N_r + N_t + 1) + 2N_r)^{1/2} \\ & ((8K + 6KM + 5N_r + (N_r + 1)^3 + K(3L + 1)^3 \\ & + 2KM(N_r + N_t + 1)^3)n_2 \\ & + (8K + 6KM + 4N_r + (N_r + 1)^2 + K(3L + 1)^2 \\ & + 2KM(N_r + N_t + 1)^2)n_2^2 + n_2^3) \end{aligned} \quad (40)$$

其中， $n_2 = (N_r + 1)^2 + 8KM + 9K + 2N_r + 1$ 。

5 仿真结果与分析

在本节中，通过仿真结果来评估所提出算法的有效性。假设一个配备 $N_t = 8$ 的BS， $N_r = 8$ 的IRS，干扰器的天线数为 $L = 4$ 。另外，BS, IRS和干扰器分别位于(0 m, 0 m)，(50 m, 10 m)和(120 m, 5 m)。所有用户和Eve随机分布在一个圆心为(70 m, 0 m)和(40 m, 0 m)，半径分别为5 m的圆内。假设信道模型包括大尺度衰落和小尺度衰落，大尺度衰落模型为 $\text{PL} = -\text{PL}_0 - 10\rho \lg(d_0)$ ，其中 ρ 为路径损耗指数， d_0 为链路距离，单位为m。 PL_0 为1 m距离的路径损耗，其中 $\text{PL}_0 = -40$ dB，对应的路径损失指数设为 $\rho_{\text{BR}} = \rho_{\text{JR}} = 2$ ， $\rho_{\text{BU}} = \rho_{\text{JU}} = \rho_{\text{BE}} = 2.2$ ， $\rho_{\text{BU}} = \rho_{\text{JU}} = \rho_{\text{BE}} = 4$ 。小尺度衰落服从瑞利衰落。定义信道 $\bar{\mathbf{h}}_m^{\text{RE}}, \bar{\mathbf{h}}_m^{\text{BE}}, \bar{\mathbf{h}}_k^{\text{JU}}, \bar{\mathbf{G}}^{\text{JR}}$ 的归一化误差上界 $\xi_{\mathbf{h}_m^{\text{RE}}} = \xi_{\mathbf{h}_m^{\text{BE}}} = \xi_{\mathbf{h}_k^{\text{JU}}} = \xi_{\mathbf{G}^{\text{JR}}}$ ，由 $\xi_{\mathbf{h}} = \zeta_{\mathbf{h}} / \|\mathbf{h}\|_2$ 给出。其余重要仿真参数设定为： $\delta_{e,m}^2 = \delta_k^2 = -80$ dBm, $P^{\text{max}} = 30$ dBm, $P_j = 20$ dBm, $\xi_{\text{P}} = 0.01$, $R_k^{\text{min}} = 0.5$ bit/(Hz·s), $K = M = 2$ 。

算法1 基于迭代的和安全速率最大化算法

初始化参数 $\{\mathbf{W}_k^{(0)}\}, \mathbf{Z}^{(0)}, \mathbf{v}^{(0)}, (y_k^2)^{(0)}, (y_k^3)^{(0)}, (\tau_{k,m})^{(0)}, (\chi_{k,m}^1)^{(0)}$, 设置迭代最大次数、收敛精度、最小安全速率约束松弛变量 ψ 的最大值 ψ^{\max}

重复

通过给定的 $\mathbf{v}^{(n-1)}, (y_k^2)^{(2n-1)}, (y_k^3)^{(2n-1)}, (\tau_{k,m})^{(2n-1)}, (\chi_{k,m}^1)^{(2n-1)}$ 求解问题(P3), 获得 $\{\mathbf{W}_k^{(n)}\}, \mathbf{Z}^{(n)}, (y_k^2)^{(2n)}, (y_k^3)^{(2n)}, (\tau_{k,m})^{(2n)}, (\chi_{k,m}^1)^{(2n)}$

通过 $\{\mathbf{W}_k^{(n)}\}, \mathbf{Z}^{(n)}, \mathbf{v}^{(n-1)}, (y_k^2)^{(2n)}, (y_k^3)^{(2n)}, (\tau_{k,m})^{(2n)}, (\chi_{k,m}^1)^{(2n)}$ 求解(P5), 获得 $\mathbf{V}^{(n)}, \mathbf{v}^{(n)} = \mathbf{V}_{1:N_r, N_r+1}^{(n)}, (y_k^2)^{(2n+1)}, (y_k^3)^{(2n+1)}, (\tau_{k,m})^{(2n+1)}, (\chi_{k,m}^1)^{(2n+1)}$,

直到满足收敛精度或到达最大迭代次数

判断 $\psi^{(n)} \leq \psi^{\max}$, 满足约束条件

图2给出了使用所提算法的和安全速率收敛图。从中可看出本文算法在经过大约25次迭代后就可以收敛, 具有较好的收敛性。同时, 系统的和安全速率随着BS天线个数增加而增加。因为越多的天线意味着波束成形效果越好, 从而提高系统的和安全速率。同时可以看出IRS反射单元个数增加对收敛性的影响相较于天线个数增加对收敛性的影响更大, 对比求解波束成形向量时只与IRS相移矩阵有关, 求解IRS相移矩阵时不仅与波束成形向量有关, 还与IRS相移矩阵的前一次迭代的值有关, 所以IRS反射单元个数对收敛速度的影响远大于天线个数对收敛速度的影响。

图3给出了不同算法和安全速率与基站最大发

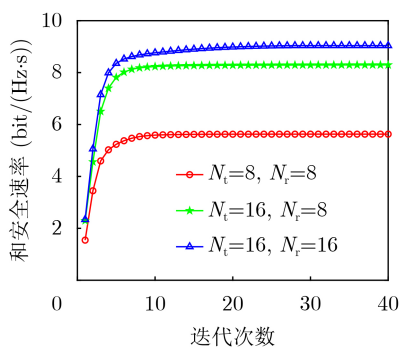


图2 和安全速率收敛图

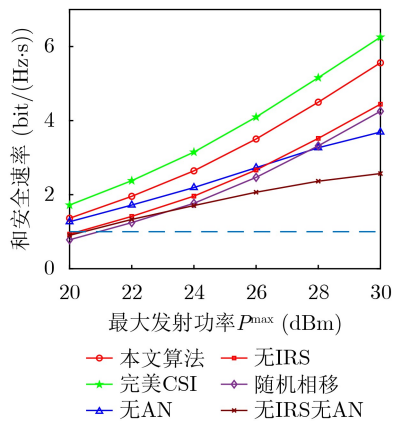


图3 最大发射功率与和安全速率的关系

射功率之间的关系。从中可以看出, 当最大发射功率较小时, 无AN算法的性能和本文算法的性能相近。但随着发射功率的增加, 无AN算法的和安全速率提升明显小于其他算法。这是因为在发射功率较低时, 将有限的发射功率分配给用户的数据传输可以快速提高和安全速率。但是随着功率的增加, 将功率直接分配给用户对和安全速率的提升效果逐渐降低。此时, 可以通过分配功率给AN来降低窃听者的信干噪比, 进而提高系统的和安全速率。因此, 在高功率下, 使用AN的算法可以更好地提升系统的安全性能。

同时, 从中可以看出, 使用IRS和AN可以减小最小功率开销, 在 $R_k^{\min} = 0.5 \text{ bit}/(\text{Hz} \cdot \text{s})$ 时, 随机相移算法、无IRS算法和无IRS无AN算法要抵抗20 dBm的干扰, 至少需要约22 dBm的发射功率, 否则将无法最小安全速率约束, 而其余算法在使用20 dBm的发射功率时依然可以满足最小安全速率约束。

图4给出了IRS反射单元个数与和安全速率的关系。从中可以看出, 除IRS随机相移算法外, 其余算法的性能随着反射单元个数增加而提高, 因为越多的反射单元可以引入更多的可控信道, 从而重新配置无线传播环境。同时, 可以看出随着IRS反

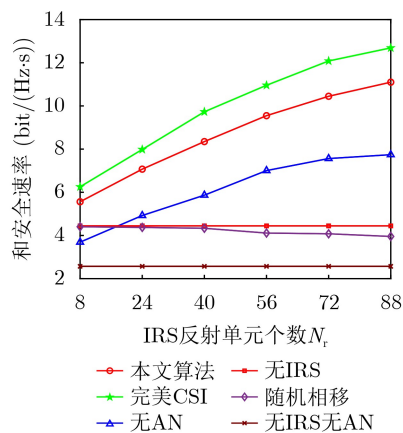


图4 IRS反射单元个数与和安全速率的关系

射单元个数的增加，和安全速率的提升速率会逐渐降低，并且IRS随机相移算法的安全速率随着IRS反射单元个数增加反而降低，且低于无IRS算法，这是因为IRS反射单元个数增加不仅会增加系统的安全速率，同样会增加更多不完美CSI的窃听信道，同时也增加了干扰功率，BS需要消耗额外的通信资源来补偿由信道不确定性和干扰功率增加所造成的性能损失，这时如果仅仅添加IRS反射单元个数而不进行相移优化反而会降低通信质量，在实际部署时需求、成本等方面综合考虑，选择最优IRS反射单元个数。

图5给出了和安全速率与干扰功率 P_j 的关系。从中可以看出，无论是IRS还是AN，均能显著提高和安全速率。此外使用IRS和AN可以提高系统的抗干扰裕度，在 $R_k^{\min} = 0.5 \text{ bit}/(\text{Hz}\cdot\text{s})$ 时，相比较无AN算法和无IRS无AN算法，其余算法能够抵抗至少30 dBm的干扰，而无AN算法只能抵抗约28 dBm的干扰，无AN无IRS算法只能抵抗26 dBm的干扰，超过28 dBm(或26 dBm)时将无法满足最小安全速率约束。

图6给出了不同算法的安全速率随着窃听者

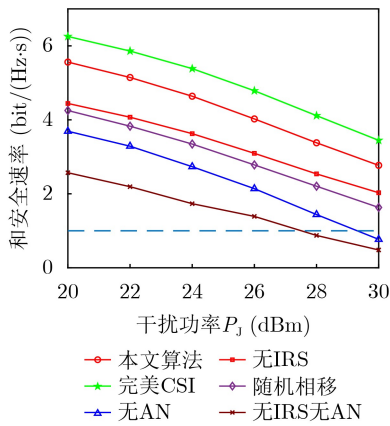


图5 干扰功率与安全速率的关系

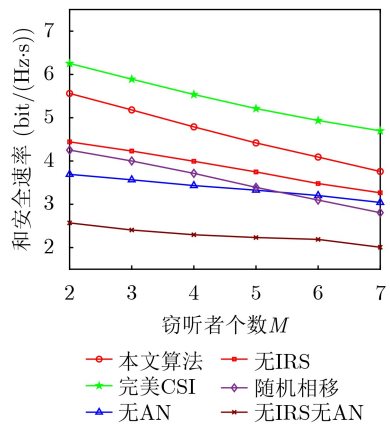


图6 窃听者个数与安全速率的关系

个数增加而变化的情况。从中可看出，随着窃听者个数增加，系统的安全速率降低，这是因为窃听者个数增加，需要消耗更多的资源满足最小安全速率约束，另一方面窃听者的信道是不确定的，BS越多需要更多的资源弥补信道不确定带来的影响。同时可以看出，无AN算法和安全速率的下降速率比无IRS算法更缓慢。因为AN虽然可以大幅降低窃听者的信干噪比，但是建立在额外功率开销的基础上。在应对窃听数量提升时，BS能够使用的功率又是有限的，所以无IRS算法下降速率较快。而IRS利用的是被动反射波束成形，不会有额外功率开销，每一个窃听者都会引入独立的反射信道，所以无AN算法变化相对较慢。

图7给出了窃听者不同分布与安全速率的关系。其中，距离 d 表示用户分布的圆心与窃听者分布的圆心之间的距离，角度 α 表示用户分布的圆心与BS的位置、窃听者分布的圆心之间连线顺时针方向夹角，仿真中用户分布的圆心为(25 m, -50 m)。从中可以看出，当窃听者距离BS比用户距离BS更近时，距离 d 对安全速率的影响较小，但窃听者与BS的距离比用户距离BS更远时，距离 d 越大防窃

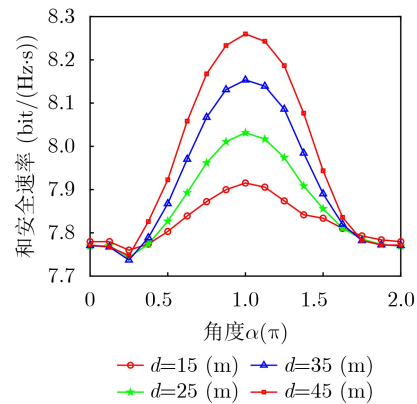


图7 窃听者分布与安全速率关系

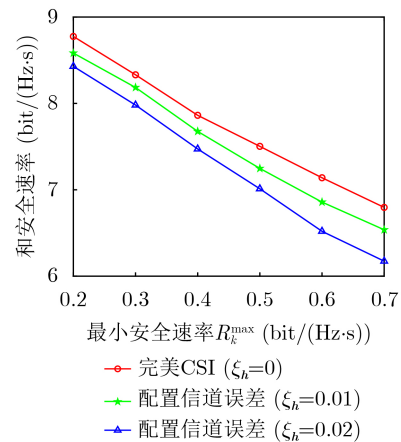


图8 最小安全速率与安全速率的关系

听效果越好。同时,当角度 α 接近 0.25π 时,窃听者处于最优窃听位置,即处于BS和IRS中间,这种情况下防窃听效果最差。

图8给出了最小安全速率与和安全速率的关系,仿真中 $K=8$ 。从中可以看出,系统和安全速率随着 R_k^{\min} 的增加缓慢下降,因为随着 R_k^{\min} 增加,系统需要更多的资源去提升较差通信链路用户的安全速率,以满足最小安全速率约束。

图9给出了不同信道误差参数的抗中断能力,仿真中 $K=8$ 。其中,保密中断表示,对当前配置参数下计算出的最优结果,在 Δh 取实际误差上界内任意值的情况下,系统中任意用户不满足最小安全速率的情况。结合图8可以看出,在考虑 $\xi_h=0.01$ 时,仅牺牲平均不到3%的和安全速率就可以降低平均35%的保密中断概率。提前考虑信道误差的虽然会牺牲一部分系统性能,但会大幅提高系统的鲁棒性。并且在参数配置时考虑的误差上界越大,中断概率越低,鲁棒性更强,但相应的和安全速率也会略有下降。在实际部署时可以根据实际信道环境,选择合适的参数配置,获得最优的系统性能。

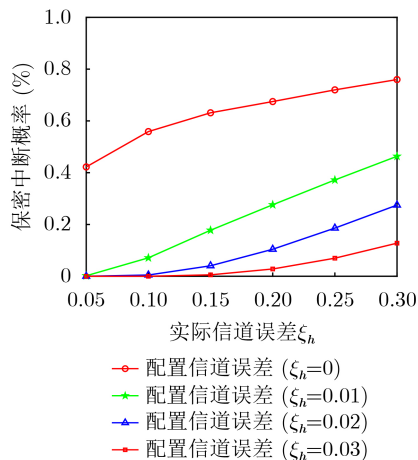


图9 保密中断概率与和信道误差的关系

6 结论

针对无线通信系统鲁棒性低、易受干扰和窃听的问题,本文提出一种IRS辅助的抗干扰安全通信系统鲁棒资源分配算法。在多用户、多窃听的情况下,考虑用户最小安全速率、最大发射功率和IRS相移约束,利用AN和波束成形优化系统最大和安全速率。对于问题的非凸性,利用连续凸逼近、泰勒级数展开法、S-程序法、符号定性法和罚函数法,将原问题转化成可以处理的凸问题。仿真结果表明,所提出算法具有较强的安全性和鲁棒性。

参考文献

- [1] ZOU Yulong, ZHU Jia, WANG Xianbin, *et al.* A survey on wireless security: Technical challenges, recent advances, and future trends[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(9): 1727–1765. doi: [10.1109/JPROC.2016.2558521](https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2558521).
- [2] GOEL S and NEGI R. Guaranteeing secrecy using artificial noise[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(6): 2180–2189. doi: [10.1109/TWC.2008.060848](https://doi.org/10.1109/TWC.2008.060848).
- [3] 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. doi: [10.1109/LWC.2022.3189272](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3189272).
- [4] KAWAI Y and SUGIURA S. QoS-constrained optimization of intelligent reflecting surface aided secure energy-efficient transmission[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 5137–5142. doi: [10.1109/TVT.2021.3075685](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3075685).
- [5] LI Baogang, WU Wenjing, LI Yonghui, *et al.* Intelligent reflecting surface and artificial-noise-assisted secure transmission of MEC system[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(13): 11477–11488. doi: [10.1109/JIOT.2021.3127534](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3127534).
- [6] 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).
- [7] SHEN Meng, LEI Xianfu, MATHIOPOULOS P T, *et al.* Robust beamforming design for IRS-aided secure communication systems under complete imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(6): 8204–8209. doi: [10.1109/TVT.2023.3243115](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3243115).
- [8] 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).
- [9] JI Zhi, YANG Wendong, GUAN Xinrong, *et al.* Trajectory and transmit power optimization for IRS-assisted UAV communication under malicious jamming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(10): 11262–11266. doi: [10.1109/TVT.2022.3187092](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3187092).
- [10] SUN Yifu, AN Kang, LUO Junshan, *et al.* Outage constrained robust beamforming optimization for multiuser IRS-assisted anti-jamming communications with incomplete information[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(15): 13298–13314. doi: [10.1109/JIOT.2022.3140752](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3140752).
- [11] 徐勇军, 符加劲, 黄琼, 等. 智能反射面辅助的多天线通信系统

- 鲁棒安全资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(1): 165–174. doi: [10.11999/JEIT221554](https://doi.org/10.11999/JEIT221554).
- XU Yongjun, FU Jiajin, HUANG Qiong, *et al.* Robust Secure resource allocation algorithm for intelligent reflecting surface-assisted multi-antenna communication systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(1): 165–174. doi: [10.11999/JEIT221554](https://doi.org/10.11999/JEIT221554).
- [12] ZHOU Gui, PAN Cunhua, REN Hong, *et al.* Robust beamforming design for intelligent reflecting surface aided MISO communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(10): 1658–1662. doi: [10.1109/LWC.2020.3000490](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3000490).
- [13] NIU Hehao, CHU Zheng, ZHOU Fuhui, *et al.* Weighted sum secrecy rate maximization using intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 6170–6184. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3085780](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3085780).
- [14] XU Yongjun, ZHAO Xiaohui, and LIANG Yingchang. Robust power control and beamforming in cognitive radio networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 1834–1857. doi: [10.1109/COMST.2015.2425040](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2425040).
- [15] SHEN Zhexion, XU Kui, and XIA Xiaochen. Beam-domain anti-jamming transmission for downlink massive MIMO systems: A stackelberg game perspective[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 2727–2742. doi: [10.1109/TIFS.2021.3063632](https://doi.org/10.1109/TIFS.2021.3063632).
- [16] BOYD S P and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [17] GHARAVOL E A and LARSSON E G. The sign-definiteness lemma and its applications to robust transceiver optimization for multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(2): 238–252. doi: [10.1109/TSP.2012.2222379](https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2222379).
- [18] XU Yongjun, XIE Hao, LIANG Chengchao, *et al.* Robust secure energy-efficiency optimization in SWIPT-aided heterogeneous networks with a nonlinear energy-harvesting model[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(19): 14908–14919. doi: [10.1109/JIOT.2021.3072965](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3072965).
- [19] BOYD S, EL GHAOU L, FERON E, *et al.* *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
- [20] LUO Zhiqian, MA W K, SO A M C, *et al.* Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(3): 20–34. doi: [10.1109/MSP.2010.936019](https://doi.org/10.1109/MSP.2010.936019).
- [21] BAHINGAYI E E and LEE K. Low-complexity beamforming algorithms for IRS-aided single-user massive MIMO mmWave systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(11): 9200–9211. doi: [10.1109/TWC.2022.3174154](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3174154).
- [22] WANG Kunyu, SO A M C, 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. doi: [10.1109/TSP.2014.2354312](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2354312).
- 席兵：男，副教授，硕导，研究方向为数字信号处理、通信网络测试及优化技术等。
- 冯彦博：男，硕士生，研究方向为移动通信技术、智能反射面和鲁棒资源分配等。
- 邓炳光：男，副教授，硕导，研究方向为通信网与测试技术、仪器科学与技术等。
- 张治中：男，教授，博导，研究方向为LTE/5G/6G移动通信与信息处理、通信网测试及仪表技术、移动大数据、物联网等。

责任编辑：余蓉