

# 基于硬件损伤的智能反射面辅助安全通信系统能效优化算法

高俊鹏<sup>①</sup> 周继华<sup>\*①②③</sup> 赵涛<sup>②③</sup> 徐勇军<sup>①③</sup> 赵瑞莉<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(航天新通科技有限公司 重庆 401332)

<sup>③</sup>(复杂环境通信重庆市重点实验室 重庆 400030)

**摘要:** 为了克服阴影衰落和障碍物阻挡的影响, 智能反射面(IRS)已经成为一种提高无线通信系统能量效率(EE)和降低硬件成本的有效技术。然而, 传统无线资源分配(RA)算法忽略了系统收发机硬件损伤(HIs)的影响, 由于放大器非线性、相位噪声的影响使得接收信号失真, 从而使得这类算法的系统性能下降。为解决该问题, 通过考虑收发机的硬件损伤和网络窃听者的影响, 该文研究基于硬件损伤的IRS辅助安全通信系统能效优化问题。首先, 基于基站的最大发射功率约束和用户的最小安全速率约束, 建立一个含硬件损伤的能效最大资源优化问题。其次, 采用辅助变量替换、半正定松弛以及Dinkelbach等方法, 将原非凸问题转化为凸问题进行求解。最后, 数值仿真结果表明, 该算法与传统资源分配算法相比, 合法用户的平均中断概率降低了43.5%, 该算法中系统的安全能效提高了8.3%, 因此, 该算法具有较好的抗硬件损伤性和安全性。

**关键词:** 安全通信; 智能反射面; 能效最大化; 硬件损伤

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)07-2349-09

DOI: 10.11999/JEIT210976

## Energy-efficient Algorithm for Intelligent Reflecting Surface-aided Secure Communication Systems with Hardware Impairments

GAO Junpeng<sup>①</sup> ZHOU Jihua<sup>①②③</sup> ZHAO Tao<sup>②③</sup> XU Yongjun<sup>①③</sup> ZHAO Ruili<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(Aerospace New Generation Communications Co. Ltd, Chongqing 401332, China)

<sup>③</sup>(Chongqing Key Laboratory of Complex Environment Communications, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** To mitigate the effects of shadow fading and obstacle blocking, Intelligent Reflecting Surface (IRS) has become an effective technology to improve Energy Efficiency (EE) and reduce hardware cost of wireless communication systems. However, traditional radio Resource Allocation (RA) algorithms have ignored the impact of Hardware Impairments (HIs) of system's transceivers. Since the distorted received signals are caused by the nonlinearity of amplifiers and the influence of phase noise. so that this type of algorithm can degrade system performance. To deal with this issue, Hardware Impairments of the transceiver and the influence of eavesdroppers is considered, and the problem of energy-saving optimization of hardware impairment in IRS-assisted secure communication systems is investigated. Firstly, an EE-based maximization resource optimization problem is formulated under the maximum transmit power constraint of the base station and the minimum secure rate constraints of users. Secondly, the original non-convex problem is transformed into a convex problem by using the auxiliary variable substitution, semidefinite relaxation and Dinkelbach's method. Finally, simulation results show that the proposed algorithm is improved 8.3% in terms of security EE and is reduced

收稿日期: 2021-09-14; 改回日期: 2021-12-21; 网络出版: 2022-01-13

\*通信作者: 周继华 jhzhou@ict.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61601071, 62071078), 国家重点研发计划(2019YFC1511300), 重庆市自然科学基金 (cstc2019jcyj-xfkX0002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601071, 62071078), The National Key Research and Development Program (2019YFC1511300), The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2019jcyj-xfkX0002)

by 43.5% in terms of the outage probability of legitimate users by comparing it with the traditional RA algorithms without HIs. Therefore, the proposed algorithm has better security and hardware damage resistance.

**Key words:** Secure communication; Intelligent Reflecting Surface(IRS); Energy Efficiency(EE) maximization; Hardware Impairments(HIs)

## 1 引言

近年来,第5代(the Fifth Generation, 5G)无线通信网络已经逐渐实现商业化,智能终端设备的指数级增长,使得无线通信系统在能耗和网络覆盖等方面面临着严峻的挑战<sup>[1]</sup>。因此,为了扩大网络规模和服务覆盖范围,中继辅助的通信系统是必不可少的。特别是对于非视距通信,在基站和终端之间设计一组中继节点,以放大转发信号,为端到端数据包传输提供更好的接收信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)<sup>[2]</sup>。由有源器件构成的中继节点,在部署、能耗以及成本方面制约了系统能量效率的提升<sup>[3]</sup>。因此,设计低成本、节能硬件辅助的绿色无线通信系统至关重要。智能反射表面(Intelligent Reflecting Surfaces, IRS)作为一种无源节能“中继”被提出,引起了学术界与工业界的广泛关注<sup>[4]</sup>。IRS是由大量无源元件组成的平面阵列,通过智能地调节相位增强入射信号,建立良好的无线传输环境,实现可靠通信。IRS作为6G的备选新技术,其低能耗、低成本、易部署及高波束增益的特点可以显著提高系统传输效率<sup>[5-7]</sup>。

在无线通信安全传输方面,目前主要分为两种保密通信方式:即传统的密码技术和物理层安全技术。前者通过网络层的密钥分配以及管理进行加密从而实现保密通信;后者通过利用合法信道特性的唯一性以及互易性来实现安全通信的。由于后者不需要产生额外的密钥开销,特别在无线资源分配领域备受关注。具体来讲无线通信系统的物理层安全性取决于接收机的保密速率(即合法用户与窃听者之间速率差是衡量保密速率的关键指标)。针对该问题,学者普遍采用人工噪声(Artificial Noise, AN)和协同干扰器<sup>[8]</sup>方法来实现物理层安全。然而,这些方法是通过收发机的信号处理,来适应无线环境的变化,但会使得硬件实现的复杂度增加,进而导致系统能耗增加。为了解决系统能耗以及物理层安全问题,IRS辅助安全通信系统具有低功耗、易部署的特点,通过反射相位优化利用多径传输来增强合法用户的接收功率和削弱窃听者的接收功率。文献<sup>[9]</sup>针对IRS辅助通信系统中存在窃听用户的问题,通过波束成形和IRS相位的联合优化来最大限度地提高系统的安全速率。文献<sup>[10]</sup>研究安全传输框架,采用IRS技术将系统能耗降至最低。

尽管许多研究工作基于IRS辅助安全通信系统

的设计,但硬件系统一直处于理想状态,忽略了收发机残余硬件损伤(Hardware Impairments, HIs)对系统的影响。特别是,大规模多输入输出系统使用的廉价硬件设备,极易受相位噪声、非线性功率放大器和I/O不均衡以及量化误差等客观因素的影响,这些因素会直接导致设备的工作模式或工作状态发生改变<sup>[11]</sup>,进而产生更严重的HIs<sup>[12]</sup>。虽然这种损伤可以通过校正和补偿算法改善,但是由功率决定的收发机的残余失真仍然存在<sup>[13,14]</sup>。因此,在IRS辅助安全通信系统中,采用HIs算法改善系统性能成为学者的研究热点<sup>[15-17]</sup>。文献<sup>[15]</sup>针对多天线通信下行链路的通信网络,考虑收发机HIs的影响,着重研究频谱效率最大化影响。文献<sup>[16]</sup>针对IRS辅助通信系统中受收发机HIs影响,通过联合优化波束成形和IRS反射相位矩阵来最大限度地提高接收SNR。文献<sup>[17]</sup>考虑HIs对上行链路最大最小化信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)的影响,分析了IRS辅助通信中参数之间对于系统性能的影响。上述文献研究贡献主要在可达速率以及SNR方面,然而在能效方面,忽略了HIs以及安全通信方面对系统性能影响。

综上所述,在IRS辅助通信系统中,没有算法同时考虑系统的HIs、安全和能效的优化问题。在IRS系统中,能效可以同时提高传输速率和降低功率消耗,是一个非常重要的性能指标;另外,现实通信系统中窃听者的存在会降低IRS系统中合法用户的安全性。因此,为了提高IRS系统的安全性、能效及抗HIs能力,本文研究了面向安全通信的IRS辅助通信系统能效最大化资源分配算法。本文主要贡献如下:

(1) 考虑HIs,将收发机硬件残留损伤建模为加性损伤噪声和放大热噪声;考虑安全传输和窃听者的影响,利用人工噪声方法来削弱窃听者的性能。考虑安全速率、最大发射功率、IRS相位约束,建立基于HIs的IRS辅助通信系统能效最大化资源分配模型。

(2) 原优化问题是一个AN向量、IRS相位矩阵、基站波束向量耦合的非凸优化问题,很难直接对其进行求解。为了求解该问题,首先利用半定规划与半定松弛方法将非凸的相移约束转化为凸约束条件;然后,利用Dinkelbach方法将原分式目标函

数转化为确定性的线性目标函数；最后，利用变量替换和1阶泰勒近似方法，将线性目标函数转化为可以求解的凸优化问题。基于得到的凸优化问题，利用现有凸优化工具箱SeDuMi进行求解。

(3) 仿真结果表明，与传统没有考虑AN的资源分配算法、随机相位算法对比，本文算法具有较好的抗HIs能力和安全性能。

## 2 系统模型及问题描述

本文考虑一个由多个合法用户和1个窃听用户组成的IRS辅助下行蜂窝通信系统，如图1所示。从图1可以看出，基站到用户的直传链路被障碍物阻挡，因此假设该系统无直传链路，只有反射链路<sup>[18]</sup>。一个配备 $N$ 根天线的基站通过一个含 $M$ 个反射单元的IRS将有效信号反射给 $L$ 个单天线合法用户，单天线窃听者可以窃听其传输信号。

假设基站和合法用户都受到残留HIs的影响。基站到IRS链路和IRS到用户链路都是假设为瑞利衰落。定义反射单元和用户集合分别为 $\forall n \in \mathcal{N} \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $\forall m \in \mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots, M\} \forall l, j \in \mathcal{L} \triangleq \{1, 2, \dots, L\}$ 。 $\Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_M})$ 表示相位矩阵， $\theta_m \in [0, 2\pi]$ 为第 $m$ 个反射单元的相移。定义 $G \in \mathbb{C}^{M \times N}$

和 $h_l \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 分别为从基站到IRS和IRS到合法用户 $l$ 的信道系数，假设AN对合法用户和窃听者都是未知的<sup>[18]</sup>。

考虑残余HIs和热噪声的影响<sup>[18]</sup>，合法用户 $l$ 的接收信号为

$$y_l = h_l \Phi G \left( \sum_l w_l s_l + z + \eta^t \right) + n_l + \eta_l^r \quad (1)$$

其中， $w_l \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为基站发给第 $l$ 个合法用户的波束成形向量。 $s_l$ 为基站发给合法用户的期望信号，且满足 $\mathbb{E}\{|s_l|^2\} = 1$ 。 $z \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为基站处的AN向量，且 $z \sim \text{CN}(0, Z)$ ,  $Z \succeq 0$ 为AN协方差矩阵<sup>[18]</sup>。 $\eta^t \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为基站处HIs噪声向量，且 $\eta^t \sim \text{CN}(0, \psi)$ ,  $\psi = (k_n^t)^2 \text{diag}(p_1, \dots, p_N)$ 为基站处加性HIs噪声的协方差矩阵<sup>[19]</sup>,  $k_n^t$ 为基站的HIs因子， $p_1, p_2, \dots, p_N$ 为发射信号向量的协方差矩阵 $P = \mathbb{E}\left\{\left\|\sum_l w_l s_l + z\right\|^2\right\} = \sum_l w_l w_l^H + Z$ 的主对角元素。 $n_l \sim \text{CN}(0, \delta_l^2)$ 为均值为零方差为 $\delta_l^2$ 的加性高斯白噪声， $\eta_l^r \sim \text{CN}\{0, (\delta_l^r)^2\}$ 为第 $l$ 个合法用户处均值为零方差为 $(\delta_l^r)^2$ 的HIs噪声<sup>[19]</sup>，且 $(\delta_l^r)^2 = (k_l^r)^2 |h_l \Phi G (\sum_l w_l s_l + z)|^2$ ,  $k_l^r$ 为第 $l$ 个合法用户的HIs因子。

因此，根据式(1)，基站发送信号经IRS反射传输给合法用户 $l$ 数据速率 $R_l$ 为

$$R_l = \log_2 \left( 1 + \frac{|h_l \Phi G w_l|^2}{|h_l \Phi G z|^2 + \sum_{j \neq l} |h_l \Phi G w_j|^2 + |h_l \Phi G \eta^t|^2 + \eta_l^r + \delta_l^2} \right) \quad (2)$$

其中，分母第1项为来自基站AN干扰，第2项为来

自其他合法用户的同频干扰，第3项为合法用户的

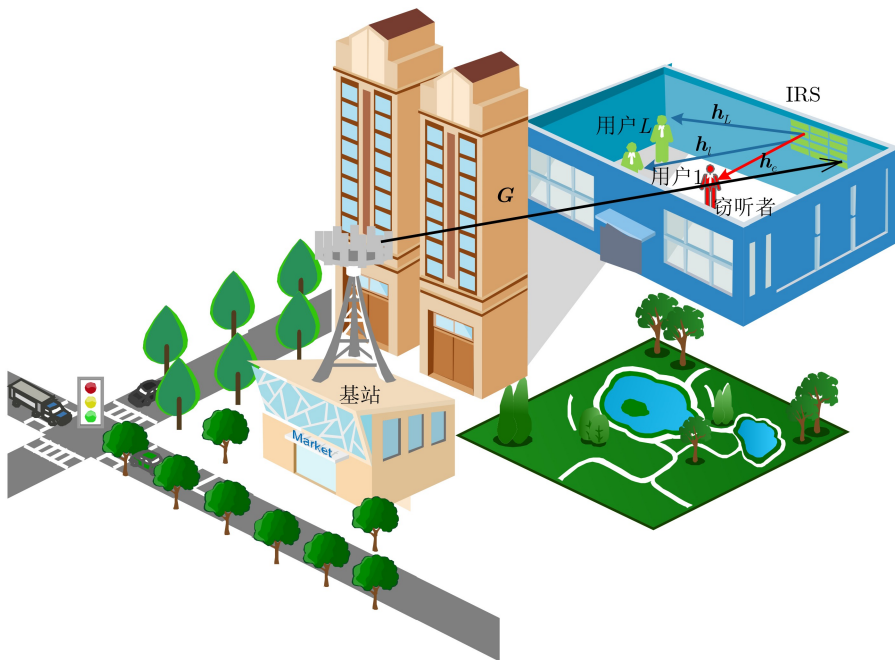


图1 系统模型

HIIs噪声干扰, 第4项为基站处HIIs噪声, 第5项为合法用户 $l$ 的高斯白噪声。

由于基站不能获得窃听者的信道状态信息, 假设窃听者没有残余的HIIs<sup>1)</sup>, 因此窃听者的接收信号为

$$y = \mathbf{h}\Phi\mathbf{G}\left(\sum_l w_l s_l + z\right) + n \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$  为IRS到窃听者的信道系数。 $n \sim \text{CN}(0, \delta^2)$ 表示均值为零方差为 $\delta^2$ 的高斯白噪声。窃听者的速率 $R_{e,l}$ 表达式

$$R_{e,l} = \log_2 \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}\Phi\mathbf{G}\mathbf{w}_l|^2}{|\mathbf{h}\Phi\mathbf{G}\mathbf{z}|^2 + \sum_{j \neq l} |\mathbf{h}\Phi\mathbf{G}\mathbf{w}_j|^2 + \delta^2} \right) \quad (4)$$

为了保证合法用户的传输性能, 合法用户的安全速率满足如式(5)的约束

$$R_l^{\text{sec}} \geq R_l^{\text{min}} \quad (5)$$

其中,  $R_l^{\text{sec}} = \max((R_l - R_{e,l}), 0)$ 。系统总功率 $P^{\text{total}}$ 为

$$P^{\text{total}} = \mu \left( \sum_l \|\mathbf{w}_l\|^2 + \|\boldsymbol{\eta}^t\|^2 \right) + P^c \quad (6)$$

其中,  $\|\cdot\|$ 表示欧几里得范数,  $\mu \geq 1$ 表示功率放大系数,  $P^c$ 是基站和用户的电路功率消耗之和, 是一常数。

为了克服HIIs和窃听干扰的影响, 基于能效最

大化的资源分配问题可以建模为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{w_l, z, \theta_m} \frac{\sum_l R_l^{\text{sec}}}{P^{\text{total}}} \\ & \text{s.t. C1: } R_l^{\text{sec}} \geq R_l^{\text{min}} \\ & \quad \text{C2: } \sum_l \|\mathbf{w}_l\|^2 + \|z\|^2 + \|\boldsymbol{\eta}^t\|^2 \leq P^{\text{max}} \\ & \quad \text{C3: } |e^{j\theta_m}| = 1, 0 \leq \theta_m \leq 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, C1为安全最小速率约束用来克服窃听者对合法用户信息安全传输的影响, C2为基站处最大发射功率约束, C3为IRS的反射相移约束。由于目标函数是分式结构以及约束条件存在非凸约束, 因此式(7)是个非凸问题。

### 3 资源分配算法设计

由于目标函数式(7)是分式, 基于Dinkelbach的方法<sup>[21]</sup>, 目标函数可以等价

$$\sum_l R_l^{\text{sec}} - \lambda P^{\text{total}} \quad (8)$$

其中,  $\lambda > 0$ 为能效辅助变量。假设 $(w_l^*, z^*, \theta_m^*)$ 为问题式(7)的最优解, 则最优能效为 $\lambda^* = \sum_l R_l^{\text{sec}}(w_l^*, z^*, \theta_m^*) / P^{\text{total}}(w_l^*)$ 。为了处理安全速率表达式的非凸问题, 定义 $\mathbf{W}_l = \mathbf{w}_l \mathbf{w}_l^H$ ,  $\mathbf{F} = \mathbf{f}^H \mathbf{f}$ 且 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_M]$ ,  $f_m = e^{j\theta_m}$ , 则 $\mathbf{f} \text{diag}(\mathbf{h}_l) \mathbf{G} = \mathbf{h}_l \Phi \mathbf{G}$ 。为了处理非凸约束C3, 利用半定规划的方法<sup>[18]</sup>, 问题式(7)可以转化为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}_l, \mathbf{Z}, \mathbf{F}, \lambda} \sum_l \left\{ \begin{aligned} & \log_2 \left( 1 + \frac{\text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{D}_l \mathbf{W}_l \mathbf{D}_l^H)}{\text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{D}_l \mathbf{Z} \mathbf{D}_l^H) + \sum_{j \neq l} \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{D}_l \mathbf{W}_j \mathbf{D}_l^H) + A_l} \right) - \\ & \log_2 \left( 1 + \frac{\text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{D}_l \mathbf{W}_l \mathbf{D}_l^H)}{\text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{D}_l \mathbf{Z} \mathbf{D}_l^H) + \sum_{j \neq l} \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{D}_l \mathbf{W}_j \mathbf{D}_l^H) + \delta^2} \right) \end{aligned} \right\} \\ & - \lambda \mu (B) - \lambda P^c \\ & \text{s.t C1, C2, } \tilde{\text{C3}}: \mathbf{F} \succeq \mathbf{0}, \text{rank}(\mathbf{F}) = 1, \text{diag}(\mathbf{F}) = \mathbf{1}_M \\ & \quad \text{C4: } \mathbf{Z} \succeq \mathbf{0} \\ & \quad \text{C5: } \mathbf{W}_l \succeq \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

<sup>1)</sup>本文优化合法用户的能效, 而窃听者位置是在网络中随机分布的, 并且潜藏在网路环境中, 并不会与基站共享信息, 所以基站不能获得窃听者的实际全部信息<sup>[17,20]</sup>, 此外, 假设不考虑窃听者硬件损伤, 即窃听者具有高质量的硬件, 也是考虑优化合法用户最坏的情况<sup>[20]</sup>。因此本文忽略窃听者硬件损伤。

其中,  $\mathbf{D}_l \in \mathbb{C}^{M \times N}$  为等价第  $l$  个合法用户的级联信道, 且  $\mathbf{D}_l = \text{diag}(\mathbf{h}_l) \mathbf{G}$ 。  $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{M \times N}$  为等价窃听者的级联信道, 且  $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{h}) \mathbf{G}$ 。  $A_l = (k_n^t)^2 \sum_n \text{Tr}(\mathbf{D}_l^H \mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{S}_n (\sum_l \mathbf{W}_l + \mathbf{Z})) + (k_l^r)^2 \sum_n \text{Tr}(\mathbf{D}_l^H \mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{S}_n (\sum_l \mathbf{W}_l + \mathbf{Z})) + \delta_l^2$ ,  $B = \sum_l \text{Tr}(\mathbf{W}_l) + (k_n^t)^2 \sum_n \text{Tr}(\mathbf{S}_n (\sum_l \mathbf{W}_l + \mathbf{Z}))$ 。其中  $\mathbf{S}_n \in \mathbb{R}^{N \times N}$  为第  $n$  个对角元素为1其余元素全为0的矩阵。

为了处理优化问题式(9)中目标函数变量  $\mathbf{W}_l$ ,  $\mathbf{Z}$  和  $\mathbf{F}$  的耦合关系, 利用变量松弛方法进行线性转化处理<sup>[8]</sup>。引入松弛辅助变量  $p_l$ ,  $q_l$ ,  $u_e$  和  $c_{e,l}$  则有

$$e^{p_l} \leq \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{Z} \mathbf{D}_l^H) + \sum_j \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{W}_j \mathbf{D}_l^H) + A_l \quad e^{u_e} \geq \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{Z} \mathbf{D}^H) + \sum_j \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{W}_j \mathbf{D}^H) + \delta^2 \quad (10) \quad (12)$$

$$e^{q_l} \geq \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{Z} \mathbf{D}_l^H) + \sum_{j \neq l} \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{W}_j \mathbf{D}_l^H) + A_l \quad e^{c_{e,l}} \leq \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{Z} \mathbf{D}^H) + \sum_{j \neq l} \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{W}_j \mathbf{D}^H) + \delta^2 \quad (11) \quad (13)$$

基于指数变换和式(10)–式(13), 因此, 问题式(9)可以松弛为如式(14)的优化问题

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_l, \mathbf{Z}, \mathbf{F}, \lambda} \sum_l \frac{p_l - q_l - (u_e - c_{e,l})}{\ln 2} - \lambda \mu(B) - \lambda P^c \\ & \text{s.t. C2, } \tilde{\text{C}}3, \text{C4, C5, } \tilde{\text{C}}1 : p_l - q_l - (u_e - c_{e,l}) \geq R_l^{\min} \\ & \text{C6 : } \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{Z} \mathbf{D}_l^H) + \delta_l^2 + (\delta_l^r)^2 + \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \psi \mathbf{D}_l^H) + \sum_j \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{W}_j \mathbf{D}_l^H) \geq e^{p_l} \\ & \text{C7 : } \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{Z} \mathbf{D}_l^H) + \delta_l^2 + (\delta_l^r)^2 + \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \psi \mathbf{D}_l^H) + \sum_{j \neq l} \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{W}_j \mathbf{D}_l^H) \leq e^{q_l} \\ & \text{C8 : } \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{Z} \mathbf{D}^H) + \delta^2 + \sum_j \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{W}_j \mathbf{D}^H) \leq e^{u_e} \\ & \text{C9 : } \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{Z} \mathbf{D}^H) + \delta^2 + \sum_{j \neq l} \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{W}_j \mathbf{D}^H) \geq e^{c_{e,l}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

定义  $e^{q_l} = e^{\bar{q}_l} (q_l - \bar{q}_l + 1)$ ,  $e^{u_e} = e^{\bar{u}_e} (u_e - \bar{u}_e + 1)$ , 其中  $\bar{\mathbf{q}} = [\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_L]^T$ , 利用1阶泰勒展开方法处理非凸约束C7和C8, 则问题式(14)可转化为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_l, \mathbf{Z}, \mathbf{F}, \lambda} \sum_l \frac{p_l - q_l - (u_e - c_{e,l})}{\ln 2} - \lambda \mu(B) - \lambda P^c \\ & \text{s.t. } \tilde{\text{C}}1, \text{C2, } \tilde{\text{C}}3, \text{C4} - \text{C6, C9} \\ & \text{C7 : } \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{Z} \mathbf{D}_l^H) + \delta_l^2 + (\delta_l^r)^2 + \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \psi \mathbf{D}_l^H) + \sum_{j \neq l} \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D}_l \mathbf{W}_j \mathbf{D}_l^H) \leq e^{\bar{q}_l} (q_l - \bar{q}_l + 1) \\ & \text{C8 : } \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{Z} \mathbf{D}^H) + \delta^2 + \sum_j \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{D} \mathbf{W}_j \mathbf{D}^H) \leq e^{\bar{u}_e} (u_e - \bar{u}_e + 1) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由于  $\tilde{\text{C}}3$  的秩一约束, 式(15)仍是一个非凸优化问题。针对该问题, 基于半定松弛法, 本文可以舍弃秩一约束<sup>[19]</sup>, 那么问题式(15)是一个凸优化问题。另外一种情况: 当系统参数使得  $\tilde{\text{C}}3$  秩一约束时, 利用高斯随机化方法来处理该约束, 使得问题式(15)变为一个凸优化问题求解。基于上述分析, 定义问题式(15)的第  $\text{iter}$  次迭代, 给定相移矩阵  $\mathbf{F}$  时目标函数值  $E_1^{(\text{iter})}$ , 给定波束向量矩阵  $\mathbf{W}_l$ , AN协方差矩阵  $\mathbf{Z}$  时, 目标函数值  $E_2^{(\text{iter})}$ 。为本文所提基于交替迭代的资源分配算法如表1所示。

#### 4 复杂度分析

假设最大外层迭代数为  $\text{iter}^{(\max)}$ ,  $\mathbf{W}_l^{(\text{iter})}$  的计算需要特征值分解复杂度为  $\mathcal{O}(N^2)$ ,  $\mathbf{Z}_l^{(\text{iter})}$  的计算需要特征值分解复杂度为  $\mathcal{O}(N^2)$ ,  $\mathbf{F}_l^{(\text{iter})}$  的计算需要特征值分解复杂度为  $\mathcal{O}(M^2)$ , 基于Dinkelbach方法, 其计算复杂度  $\mathcal{O}(2NM^2)$ ,  $\mathbf{W}_l \succ \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{Z} \succ \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{F} \succ \mathbf{0}$ , 其线性不等式的计算复杂度为  $\mathcal{O}(N)$ ,  $\mathcal{O}(N)$ ,  $\mathcal{O}(M)$ , 解决SDP问题的复杂度为  $\mathcal{O}(M)^{4,5}$ , 因此, 所提算法的最大计算复杂度为  $\mathcal{O}(\text{iter}^{(\max)} L(2NM^2 + 2N^2 + M^2 + M^{4.5} + 2N + M))$ 。

表1 基于交替迭代的资源分配算法

初始化系统参数: 初始化相移矩阵 $\mathbf{F}^{(0)}$ , 设置初始迭代次数 $\text{iter} = 1$ , 最大迭代次数 $\text{iter}^{(\max)}$ , 初始能效值 $\lambda^{(0)}$ , 初始化松弛辅助变量 $\bar{q}_l^{(0)}$ ,  $\bar{u}_e^{(0)}$ , 收敛精度 $\varepsilon = 10^{-4}$ 。

---

步骤1 for  $\text{iter} = 1, 2, \dots, \text{iter}^{(\max)}$  do

步骤2 根据给定相移矩阵 $\mathbf{F}$ , 系统能效值 $\lambda$ 以及松弛辅助变量 $\bar{q}_l, \bar{u}_e$ 。求解问题式(15)得到波束向量矩阵 $\mathbf{W}_l^{(\text{iter})}$ , AN协方差矩阵 $\mathbf{Z}^{(\text{iter})}$ , 以及松弛辅助变量 $p_l^{(\text{iter})}, q_l^{(\text{iter})}, u_e^{(\text{iter})}, c_{e,l}^{(\text{iter})}, c_{e,l}^{(\text{iter})}$ 。

步骤3 更新松弛变量 $\bar{q}_l^{(\text{iter})} = q_l^{(\text{iter})}, \bar{u}_e^{(\text{iter})} = u_e^{(\text{iter})}$ 。

步骤4 对 $\mathbf{W}_l^{(\text{iter})}$ 进行特征值分解 $\mathbf{W}_l^{(\text{iter})} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^H$ , 以获得次优解 $\mathbf{w}_l^{(\text{iter})} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}^{(1/2)}\mathbf{r}, \mathbf{r} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I})$ 。

步骤5 根据波束向量 $\mathbf{W}_l^{(\text{iter})}$ , AN协方差矩阵 $\mathbf{Z}^{(\text{iter})}$ , 以及松弛辅助变量 $p_l^{(\text{iter})}, q_l^{(\text{iter})}, \bar{u}_e^{(\text{iter})}, c_{e,l}^{(\text{iter})}, c_{e,l}^{(\text{iter})}$ ,  $\mathbf{F}^{(\text{iter})}$ 。求解系统能效值 $\lambda^{(\text{iter})} = \sum_l \frac{p_l^{(\text{iter})} - q_l^{(\text{iter})} - (u_e^{(\text{iter})} - c_{e,l}^{(\text{iter})})}{(\mu(B) + Pc)\ln 2}$ , 目标函数 $E_2^{(\text{iter})}$ 。

步骤6 对 $\mathbf{F}^{(\text{iter})}$ 采用步骤4中的方法来求解 $\mathbf{F}^{(\text{iter})}$ 。

步骤7 if  $\frac{|E_1^{(\text{iter}+1)} - E_1^{(\text{iter})}|}{|E_1^{(\text{iter})}|} \leq \varepsilon$  and  $\frac{|E_2^{(\text{iter}+1)} - E_2^{(\text{iter})}|}{|E_2^{(\text{iter})}|} \leq \varepsilon$  and  $\frac{|\lambda^{(\text{iter}+1)} - \lambda^{(\text{iter})}|}{|\lambda^{(\text{iter})}|} \leq \varepsilon$ .  
break  
else  
iter = iter + 1.  
end

步骤8 end

步骤9 输出所需要的优化变量 $\lambda^*, \mathbf{f}^*, \mathbf{w}_l^*, \mathbf{Z}^*$ 。

---

## 5 仿真结果与分析

本文考虑了3维笛卡儿坐标系如图2所示, 假设基站的中心点, IRS的中心点, 用户簇的中心点, 窃听者的中心点分别为 $(17.6, 0, 11)$ ,  $(0, 3, 2)$ ,  $(2, 4, 1.5)$ ,  $(2.2, 3, 1.5)$ , 距离单位为m。通过Matlab仿真验证所提出算法的有效性。信道模型为 $D_M = \sqrt{\xi_0(1/d_B)^{\alpha_k}} g_{BL}, \forall k = \{1, 2, 3\}$ , 其中 $\xi_0 = -30$  dBm为参考距离为1 m时的路径损耗,  $\alpha_k \in [2, 5]$ 是衰减因子, 其中 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 3$ 分别定义为信道系数 $\mathbf{G}, \mathbf{h}_l, \mathbf{h}_e$ 的路径损耗因子, 小尺度衰落系数 $g_{BL} \sim \text{CN}(0, 1)^{[14-17]}$ 。  $k_n^t = k_l^r \in [0, 0.3]^{[16,17]}$ , 其他参数如表2所示。

图3给出了系统能效收敛图, 其中最小安全速率阈值 $R_l^{\min}$ 为0.2 bit/(Hz·s)。从图3可明显地看出, 本文算法在经过6次迭代后达到收敛, 说明所提算法具有较好的收敛性。且随着最大发射功率 $P^{\max}$ 的增加, 系统能效增大。原因是系统发射功率阈值增大, 基站会有更多功率用于信息发送, 来满足条件C2, 进而系统的吞吐量越大, 导致系统能效就会增大。

图4在不同算法下, 系统能效与最大发射功率的关系。从图4中可以明显地看出, 随着 $P^{\max}$ 增加, 不同算法系统能效先逐渐增加然后趋于稳定, 原因是随着发射功率阈值的增大, 基站分配给用户

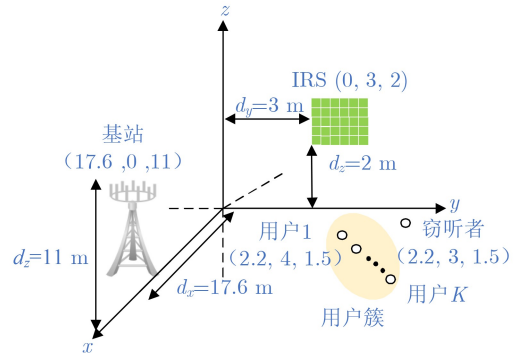


图2 仿真安全通信场景

表2 系统仿真参数

参数	值	参数	值
$N$	2	$M$	2
$\delta_l^{2[S]}$	-74 dBm	$\delta^{2[S]}$	-74 dBm
$\mu^{[15]}$	1	$Pc^{[15]}$	10 dBm
$\xi_0$	-30 dBm	$\delta^{2[S]}$	-74 dBm
$\varepsilon$	$10^{-4}$	$P^{\max}$	30.8 dBm

功率增加, 从而导致系统能效增加。然而进一步增加最大发射功率阈值, 发射功率达到最优值, 系统能效趋于稳定。此外, 在相同的 $P^{\max}$ 取值下, 本文算法优于传统资源分配算法。原因是IRS反射相位进行优化, 从而使得合法用户具备高效传输速率。

基站侧添加AN，通过抑制窃听者窃听速率，从而提高合法用户信息保密传输速率。

图5说明在不同算法下，不同的HIs因子对系统能效的关系。从图5可以明显地看出，同一算法下，随着 $k_l^i, k_n^i$ 的减少，系统能效会增加，原因是基站及用户硬件的损伤噪声干扰功率减少，导致系统能效增加。

图6说明在不同算法下，系统的最大安全速率阈值与系统能效关系，从图6可以明显地看出，随着安全速率阈值 $R^{\min}$ 的增加，系统能效会先保持平

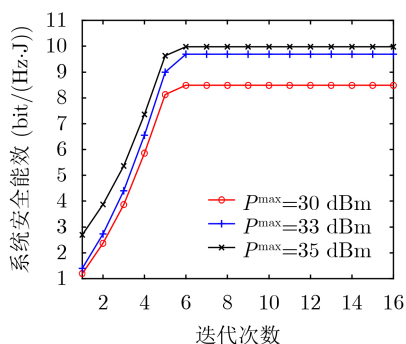


图3 系统能效收敛图

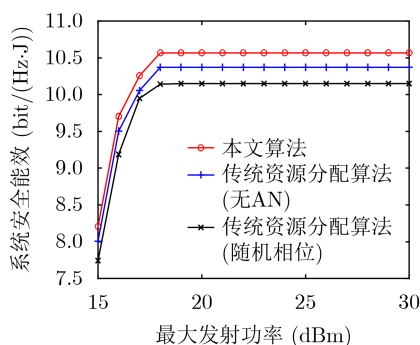


图4 不同算法下能效与最大发射功率的关系

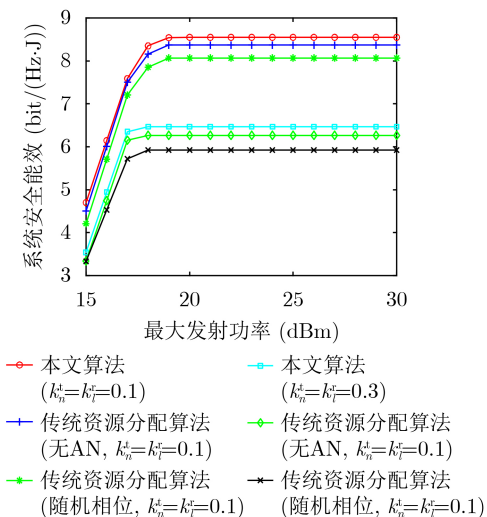


图5 能效与最大发射功率在不同HIs因子以及算法下的关系

稳，再降低。原因是在较小的安全速率约束条件下，用户吞吐量容易满足安全速率约束条件，就会保持不变，但随着安全速率阈值的增大，需要增大发射功率来满足安全速率约束条件，进而增加系统功率，从而使得系统能效降低。

图7为在不同算法下，IRS的单元个数与系统能效的关系，随着IRS的单元个数增加，系统能效也增加，且呈现正相关，这是因为IRS反射单元个数增加，从基站接收阵列增益增大，通过优化相移，使得更多的发射波束形成较大的增益，从而获得更高的系统能效。另外，本文算法与传统资源分配算法相比，系统安全能效最大提高8.3%。

图8说明在不同算法下，合法用户平均中断概率与安全速率阈值的关系，从图8可以看出，随着安全速率阈值增加，合法用户的平均中断概率逐渐增大。因为安全速率阈值越大，合法用户的安全速率约束越难以满足，从而使得合法用户的中断概率增大。另外，本文算法分别与传统资源分配算法相比，平均中断概率分别降低了43.5%、23.7%、8.9%。因为本文算法为了克服硬件损伤的影响，通过分配

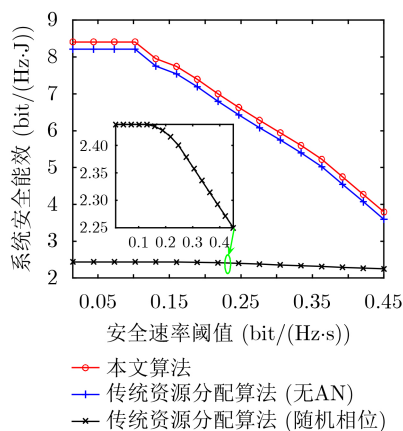


图6 能效与安全速率阈值在不同算法下的关系

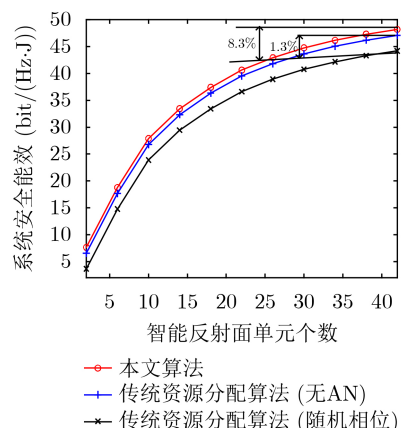


图7 能效与智能反射面单元数量在不同算法下的关系

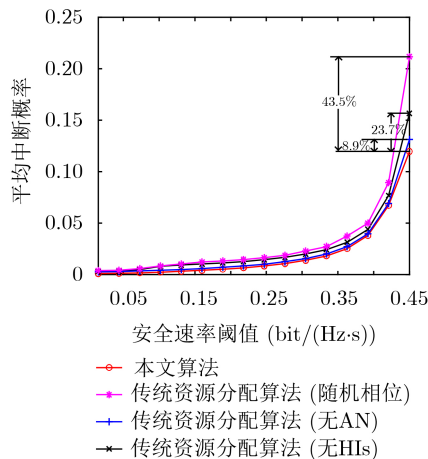


图8 中断概率与安全速率阈值在不同算法下的关系

更多的功率给合法用户满足 $C_1$ 约束, 因此本文算法具有更强的抗硬件损伤能力。当系统收发机出现更严重的硬件损伤时, 系统仍然能够保证合法用户的通信质量。

## 6 结束语

本文针对基于HIs的IRS辅助安全通信系统中波束成形设计问题展开研究, 考虑收发机处HIs的影响以及基站的最大发射功率约束和每个用户的最大安全速率约束, 建立一个IRS辅助多用户安全通信系统能效最大的波束成形优化问题。针对该非凸问题, 采用辅助变量替换和半定规划、半正定松弛以及Dinkelbach方法将其转化为等价的凸优化问题进行求解。最后, 在安全能效方面, 所提算法与传统资源分配算法相比, 图7本文算法中系统的安全能效提高了8.3%。在合法用户中断概率方面, 与传统资源分配算法相比, 图8本文算法中合法用户的平均中断概率降低了43.5%。因此, 本文算法具有较好的抗硬件损伤性和安全性。在未来研究工作中, 进一步研究离散相移和主动IRS对系统性能的影响。具体来讲, 由于IRS受限于FPGA物理器件的硬件特性, 在基于硬件损伤的未来IRS辅助通信系统网络中, 无法提供连续相移调控, 因此考虑离散相移调控, 对系统性能的分析与进一步优化是十分必要的。另外, 面对未来网络的空间复杂性与复杂干扰, 传统无源IRS辅助通信网络的传输距离是受限的, 因此研究与分析有源IRS通信网络性能是未来一个重要的研究方向。

## 参考文献

- [1] 徐勇军, 刘子隼, 李国权, 等. 基于NOMA的无线携能D2D通信鲁棒能效优化算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1289–1297. doi: 10.11999/JEIT200175.
- [2] XU Yongjun, GUI Guan, GACANIN H, et al. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 668–695. doi: 10.1109/COMST.2021.3059896.
- [3] 徐勇军, 谷博文, 杨洋, 等. 基于不完美CSI的D2D通信网络鲁棒能效资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(8): 2189–2198. doi: 10.11999/JEIT200587.
- [4] XU Yongjun, GU Bowen, YANG Yang, et al. Robust energy-efficient resource allocation algorithm in D2D communication networks with imperfect CSI[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(8): 2189–2198. doi: 10.11999/JEIT200587.
- [5] WU Qingqing and ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106–112. doi: 10.1109/MCOM.001.1900107.
- [6] WU Qingqing and ZHANG Rui. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1838–1851. doi: 10.1109/TCOMM.2019.2958916.
- [7] WU Qingqing and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394–5409. doi: 10.1109/TWC.2019.2936025.
- [8] WU Qingqing, ZHANG Shuowen, ZHENG Beixiong, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3313–3351. doi: 10.1109/TCOMM.2021.3051897.
- [9] ZHOU Fuhui, CHU Zheng, SUN Haijian, et al. Artificial noise aided secure cognitive beamforming for cooperative MISO-NOMA using SWIPT[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(4): 918–931. doi: 10.1109/JSAC.2018.2824622.
- [10] GUI Miao, ZHANG Guangchi, and ZHANG Rui. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410–1414. doi: 10.1109/LWC.2019.2919685.
- [11] FENG Biqian, WU Yongpeng, and ZHENG Mengfan. Secure transmission strategy for intelligent reflecting surface



- enhanced wireless system[C]. 11th International Conference On Wireless Communications and Signal Processing, Xi'an, China, 2019: 1–6. doi: [10.1109/WCSP.2019.8928063](https://doi.org/10.1109/WCSP.2019.8928063).
- [11] ZHANG Jiayi, DAI Linglong, ZAHNG Xinlin, *et al.* Achievable rate of rician large-scale MIMO channels with transceiver hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(10): 8800–8806. doi: [10.1109/TVT.2015.2504428](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2504428).
- [12] XING Zhe, WANG Rui, WU Jun, *et al.* Achievable rate analysis and phase shift optimization on intelligent reflecting surface with hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(9): 5514–5530. doi: [10.1109/TWC.2021.3068225](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3068225).
- [13] KHANSEFID A, Minn H, Zhan Qi, *et al.* Waveform parameter design and comparisons for millimeter-wave massive MIMO systems with RF distortions[C]. IEEE Globecom Workshops, Washington, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOMW.2016.7849081](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7849081).
- [14] ZHANG Jiayi, XUE Xipeng, BJÖRNSON E, *et al.* Spectral efficiency of multipair massive MIMO two-way relaying with hardware impairments[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(1): 14–17. doi: [10.1109/LWC.2017.2750162](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2750162).
- [15] ZHOU Shaoqing, XU Wei, WANG Kezhi, *et al.* Spectral and energy efficiency of IRS-assisted MISO communication with hardware impairments[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(9): 1366–1369. doi: [10.1109/LWC.2020.2990431](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2990431).
- [16] SHEN Hong, XU Wei, GONG Shulei, *et al.* Beamforming optimization for IRS-aided communications with transceiver hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(2): 1214–1227. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3033575](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3033575).
- [17] PAPAZAFEIROPOULOS A, PAN Cunhua, ELBIR A, *et al.* Asymptotic analysis of max-min weighted SINR for IRS-assisted MISO systems with hardware impairments[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, To be published. doi: [10.1109/LWC.2021.3095678](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3095678).
- [18] 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).
- [19] XU Yongjun, XIE Hao, and HU R Q. Max-min beamforming design for heterogeneous networks with hardware impairments[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(4): 1328–1332. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3044936](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3044936).
- [20] ZHOU Gui, PAN Cunhua, REN Hong, *et al.* Secure wireless communication in RIS-aided MISO system with hardware impairments[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(6): 1309–1313. doi: [10.1109/LWC.2021.3064992](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3064992).
- [21] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. *Management Science*, 1967, 13(7): 492–498. doi: [10.1287/mnsc.13.7.492](https://doi.org/10.1287/mnsc.13.7.492).
- 高俊鹏：男，1988年生，博士生，研究方向为智能反射面、鲁棒资源分配等。
- 周继华：男，1979年生，研究员，博士生导师，研究方向为智能反射面、无线通信等。
- 赵涛：男，1983年生，研究员，硕士生导师，研究方向为智能反射面、移动网络等。
- 徐勇军：男，1986年生，副教授，硕士生导师，研究方向为异构无线网络、智能反射面、鲁棒资源分配等。
- 赵瑞莉：女，1990年生，博士生，研究方向为智能反射面、空地一体化网络、空地融合车联网等。

责任编辑：余蓉