

基于非理想条件可重构智能超表面辅助无线携能通信-非正交多址接入系统通感性能研究

李兴旺^{*①} 王新莹^① 田心记^① 王心水^② 秦攀科^③ 陈慧^①

^①(河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454003)

^②(曲阜师范大学计算机学院 日照 276826)

^③(河南理工大学计算机科学与技术学院 焦作 454003)

摘要: 为满足日益增长的高效通信和可靠感知需求, 该文提出可重构智能超表面(RIS)辅助无线携能通信(SWIPT)-非正交多址接入(NOMA)系统, 该系统同时实现目标感知和信息传输。考虑非完美连续干扰消除(SIC)和信道估计误差(CEE)两种非理想因素, 分析了所提系统的可靠性、有效性以及雷达感知性能, 分别推导出系统中断概率(OP)、遍历速率(ER)、检测概率(PoD)以及雷达估计信息速率(REIR)的解析表达式。分析结果表明: 非完美SIC和CEE对系统的性能有负面影响; 中断概率随基站发射功率的增大而减小, 在高信噪比区域趋于定值; 遍历速率及雷达估计信息速率随基站发射功率增大而增加, 在高信噪比区域稳定于一个上限值; 在不同的检测阈值下, 检测概率随基站发射功率的增大而增大; 联合雷达检测和通信覆盖概率(JRDCCP)分别随中断阈值和检测阈值的升高而降低。

关键词: 通感一体化; 可重构智能超表面; 无线携能通信; 非正交多址接入

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)06-2434-09

DOI: 10.11999/JEIT231395

Communication and Sensing Performance Analysis of RIS-assisted SWIPT-NOMA System under Non-ideal Conditions

LI Xingwang^① WANG Xinying^① TIAN Xinji^① WANG Xinshui^②
QIN Panke^③ CHEN Hui^①

^①(School of Physics and Electronic Information, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

^②(College of Computer, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

^③(College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: To meet the escalating demands for efficient communication and reliable sensing, a Reconfigurable Intelligent Surface(RIS)-assisted Simultaneous Wireless Information and Power Transfer(SWIPT)-Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA) system is proposed in this paper. This system is designed to concurrently achieve target sensing and information transmission. Considering the imperfections of Successive Interference Cancellation (SIC) and Channel Estimation Error (CEE), a comprehensive analysis of the system's reliability, effectiveness, and radar sensing performance is conducted. Analytical expressions for the Outage Probability (OP), Ergodic Rate (ER), Probability of Detection (PoD), and Radar Estimation Information Rate (REIR) of the system are derived to provide insights into its performance. The analysis results reveal the following findings: the presence of imperfect SIC and CEE adversely impacts the system's performance; the OP diminishes as the transmitted power of base station increases, eventually converging to a constant value in the high Signal-to-Noise Ratio (SNR) region; both the ER and the REIR increase with the base station's

收稿日期: 2023-12-19; 改回日期: 2024-04-15; 网络出版: 2024-05-10

*通信作者: 李兴旺 lixingwang@hpu.edu.cn

基金项目: 河南省重点研发专项(231111210500), 山东省自然科学基金(ZR2021MF013), 测绘科学与技术“双一流”学科创建项目(GCCRC202306), 河南理工大学博士基金(B2018-39)

Foundation Items: The Key Research and Development Project of Henan Province (231111210500), The Natural Science Foundation of Shandong Province of China (ZR2021MF013), “Double First-Class” Discipline Creation Project of Surveying Science and Technology (GCCRC202306), The Doctoral Scientific Funds of Henan Polytechnic University (B2018-39)

transmitted power and eventually stabilize at an upper limit value in the high SNR region; the PoD increases with the base station's transmit power at different detection thresholds; the Joint Radar Detection and Communication Coverage Probability (JRDCCP) decreases with the outage threshold and detection threshold, respectively.

Key words: Integrated Sensing And Communication(ISAC); Reconfigurable Intelligent Surface(RIS); Simultaneous Wireless Information and Power Transfer(SWIPT); Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA)

1 引言

第6代(the Sixth Generation, 6G)移动通信技术预计在2030年左右落地, 在规划新一代移动通信的框架和总体目标时, 通感一体化(Integrated Sensing And Communication, ISAC) 被国际移动通信-2030 (International Mobile Telecommunications-2030, IMT-2030)定义为6G的6大应用场景之一^[1]。ISAC是集成通信和感知功能的一种设计方法和使能技术, 是公认的解决日益增长的频谱拥挤问题和满足新兴技术所需的强大感知和通信能力的关键推动者, 引起了学术界和工业界广泛的研究兴趣^[2]。通感一体化又称为雷达通信一体化^[3]、双功能雷达通信^[4]、联合通信和雷达感知^[5]等。与此同时, 为进一步解决未来移动通信所面临的广覆盖范围、高质量通信需求以及传输节点能量受限等问题, 研究者们分别提出了一些富有应用前景的关键技术, 如非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)^[6]、可重构智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)^[7]和无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)^[8]等。

近年来, 通信与雷达感知频谱的重叠以及两者在硬件架构和信号处理等方面的相似, 不断推动着通感一体化框架的发展^[9]。文献^[10]分析了以通信为中心、以感知为中心以及帕累托最优3种情况下, 下行多输入多输出ISAC系统的中断概率(Outage Probability, OP)、通信速率和感知速率性能。从互信息量的角度出发, 文献^[11]提出了以互信息量为基础的通信和感知性能评价指标, 并推导出上下行ISAC系统的感知-通信速率区域和高信噪比斜率表达式。在相关的通信和感知信道下, Zhuo等人^[12]提出了多波束ISAC系统的传感辅助波束对准方法, 并推导出位置估计的克拉美-罗界(Cramér-Rao Bound, CRB)性能。文献^[13]根据实际带宽分配情况, 将ISAC系统的带宽分为了通信带宽、雷达带宽和ISAC带宽, 并对上行ISAC系统的中断概率、遍历通信速率、遍历雷达估计信息速率(Radar Estimation Information Rate, REIR)性能进行了推导分析。

为进一步提升大规模连接中的频谱效率并解决ISAC系统中通信和感知信号之间的干扰问题, 将NOMA技术引入到ISAC系统是一种行之有效的解决方案^[14]。不同于传统的正交多址, NOMA能够利用同一时间/频率/码域资源为多位用户提供服务, 在接收端使用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术来消减用户间干扰并实现信号检测^[15,16]。文献^[17,18]采用通信信号来研究NOMA在ISAC中的应用, 以支持组播传输和消减用户间干扰。Wang等人^[14]联合优化通信和雷达信号波束, 并在接收时采用 SIC 方案来消减感知信号对通信信号的干扰, 研究结果表明NOMA能实现与理想雷达相当的干扰消除效果和性能增益。文献^[19]研究了分别以通信和感知为中心的两SIC解码顺序下, 下行NOMA-ISAC系统通信和感知性能, 分析结果表明, SIC 解码顺序会改变高信噪比下的功率偏移和阵列增益, 从而影响系统的通信和感知速率。对于用户采用NOMA协议解码的上行ISAC系统, 文献^[20]推导了系统的OP、遍历通信速率和感知速率表达式, 与频分传感与通信系统相比, ISAC系统在达到相同的通信速率时可实现更高的感知速率。

为满足ISAC系统所需的高速率通信和可靠感知需求, 同时克服不可控的电磁波传播、硬件复杂度高和能耗大等方面的约束^[21], RIS通过节能和高效的硬件配置方式实现对无线传播环境的重塑, 是6G网络中提升通信性能的关键使能技术之一^[22]。Chepuri等人^[23]考虑了一种RIS辅助的多输入多输出ISAC系统模型, 证明了RIS可通过促进通信信道和感知信道之间的耦合, 来实现系统的高速率通信和对远程目标的准确估计。考虑到被检测目标的尺寸问题, 根据目标散射表面积上的照明功率, 文献^[24]推导出RIS辅助的毫米波ISAC系统的检测概率的闭式表达式, 并提出了极限检测分辨率的概念来衡量对目标的检测能力。考虑到多用户干扰(Multi-User Interference, MUI) 问题, 文献^[25]在到达角的CRB约束下, 通过联合优化波形和RIS相移最小化MUI。与理想信道状态信息(Channel State Information, CSI)状态相比, 文献^[26]的研究表明非

理想CSI会使RIS辅助的通信系统的中断概率、平均误码率和平均容量性能有所下降。

此外,面对未来ISAC系统中庞大无线设备的能量供应问题,SWIPT技术有望成为有效的解决方案^[27]。SWIPT的概念最早在文献^[28]中提出,通过使用SWIPT技术,用户可在接收到无线信息的同时从接收到的信号中获取能量,引起了研究者们对节能网络的广泛关注。为解决远端用户存在的物理阻碍和阴影问题,文献^[29]中近端用户采用SWIPT技术为远端用户提供能量供应和信息传输,推导出下行SWIPT辅助NOMA系统的中断概率表达式。在与RIS和NOMA联合研究方面,对于双用户多输入单输出NOMA下行链路,文献^[30]提出了采用RIS辅助混合时间切换(Time-Switching, TS)方式的SWIPT和发射天线选择协议的协同传输方案,推导出最优和最差情况下中断概率的闭式表达式。

鉴于目前将ISAC、NOMA、RIS、SWIPT等技术进行结合,并对系统整体通信与感知性能的研究仍旧空缺,故为填补这部分空缺,本文提出能同时目标感知和信息传输的RIS辅助SWIPT-NOMA通感一体化系统。同时,在考虑两类信道估计误差(Channel Estimation Error, CEE)和非完美SIC两种非理想因素下,推导出系统的通信OP、遍历速率(Ergodic Rate, ER)、感知的检测概率、REIR以及联合雷达检测和通信覆盖概率(Joint Radar Detection and Communication Coverage Probability, JRDCPP)解析表达式,研究结果表明CEE和非完美SIC的存在会导致系统通信性能和感知性能的下降。

2 系统模型及信息传输

2.1 系统模型

本文考虑一种RIS辅助下行SWIPT-NOMA通感一体化系统,系统由一个基站(Base Station, BS)、近端用户(Alice)、远端用户(Bob)以及一个元件个数为128的RIS组成。除基站和Alice之外均考虑为单天线,Alice工作在全双工模式下并假设空间分离良好,不考虑自干扰的问题;BS以TS的方式对Alice进行无线携能通信。

能量传输过程包括两条路径,一条是由BS直接传给用户Alice,另一条是由BS经过RIS反射给Alice。当进行信息传输时,BS向Alice和Bob分别发射通信信号,信号传输经过两个路径:直连链路和由RIS辅助的级联链路;同时Alice利用收集到的能量,来实现向前方Bob的探测波束的发射。 g_{ba} , g_{bb} , h_{br} 分别表示BS到Alice和Bob以及RIS的直连信道, h_{ra} 和 h_{rb} 分别表示RIS到Alice和Bob的信道, f_{ab} 和 f_{ba} 表示Alice向Bob发射和接收信号的信道,

假设上述信道均为瑞利信道,经过RIS的级联信道等效为瑞利信道^[31];同时考虑了CEE的存在,通过使用最小均方误差来获得信道系数,表示为 $h_i = \hat{h}_i + e_i$ ^[6],其中, $\hat{h}_i$ 为估计信道, $e_i \sim \text{CN}(0, \sigma_{e_i}^2)$ 为信道估计误差,考虑两种信道估计模型:(1) e_i 为一个与信噪比无关的固定常数;(2) e_i 表示为 $e_i = \Omega_i / (1 + \delta\gamma\Omega_i)$,其中 $\Omega_i = d^{-\alpha}$ 为信道的方差, δ 为信道估计质量的一个常数, $\delta \geq 0$, γ 为平均信噪比。

2.2 系统能量收集和信息传输

在能量收集阶段, Alice从接收到的信号中收集能量表示为

$$E_A = P_{BS}\eta\rho T \left(\left| \hat{h}_{ra}\Theta_A\hat{h}_{br} + \hat{g}_{ba} \right|^2 + e_{ba} \right) \quad (1)$$

其中, η 表示能量收集系数, ρ 表示用于能量收集的时间分配因子, e_{ba} 为BS与Alice之间级联信道的估计误差, T 表示每个传输帧的总时间, P_{BS} 为BS的总发射功率。Alice的发射功率表示为^[32]。

$$P_A = \frac{P_{BS}\eta\rho T \left(\left| \hat{h}_{ra}\Theta_A\hat{h}_{br} + \hat{g}_{ba} \right|^2 + e_{ba} \right)}{4\pi d^2(1-\rho)} \quad (2)$$

其中, d 表示Alice与Bob之间的距离。

在信息传输部分, BS将叠加后的信号通过功率域复用发送给近端用户Alice和远端用户Bob, BS发射的信号表示为

$$x_{BS} = \sqrt{\alpha_a P_{BS}}x_a + \sqrt{\alpha_b P_{BS}}x_b \quad (3)$$

其中, x_a 和 x_b 分别表示BS发送给Alice和Bob的信号, α_a 和 α_b 分别是发射 x_a 和 x_b 的功率分配因子, 满足关系式 $\alpha_a + \alpha_b = 1$ 和 $\alpha_b > \alpha_a$ 。假设Alice和Bob之间的距离较近, 不考虑 f_{ab} 和 f_{ba} 信道的估计误差, Bob处接收到的信号可以表示为

$$y_B = x_{BS} \left(\hat{h}_{rb}\Theta_B\hat{h}_{br} + \hat{g}_{bb} \right) + f_{ab}\sqrt{P_A}x_r(t) + n_b(t) \quad (4)$$

其中, x_r 表示Bob接收到的雷达信号, e_{bb} 表示BS与Bob之间级联信道的估计误差, n_b 是复高斯噪声, $n_b \sim \text{CN}(0, \sigma_b^2)$ 。

根据SIC解码顺序, Bob对接收信号进行解码时, 只需解码自己的信息即可, 将 x_a 视为噪声。则解码时的信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)可表示为

$$\gamma_{x_b}^{BB} = \frac{\alpha_b P_{BS} \left| \hat{h}_{rb}\Theta_B\hat{h}_{br} + \hat{g}_{bb} \right|^2}{\alpha_a P_{BS} \left| \hat{h}_{rb}\Theta_B\hat{h}_{br} + \hat{g}_{bb} \right|^2 + P_A |f_{ab}|^2 + \sigma_b^2 + \sigma_{ebb}^2 P_{BS}} \quad (5)$$

其中, σ_{ebb}^2 为BS与Bob之间级联信道的估计误差。Alice处接收到的信号可以表示为

$$y_A = \begin{cases} x_{\text{BS}} (\hat{h}_{\text{ra}} \Theta_A \hat{h}_{\text{br}} + \hat{g}_{\text{ba}} + e_{\text{ba}}) + n_a(t), & H_0 \\ x_{\text{BS}} (\hat{h}_{\text{ra}} \Theta_A \hat{h}_{\text{br}} + \hat{g}_{\text{ba}} + e_{\text{ba}}) + f_{\text{ab}} f_{\text{ba}} \sqrt{\sigma_{\text{rcs}} P_A} x_r \left(t - \frac{2d}{c}\right) + n_a(t), & H_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, H_0 和 H_1 分别表示Alice未接收到和接收到雷达回波信号的情况, σ_{rcs} 为雷达横截面(Radar Cross-Section, RCS), c 为光速, n_a 是复高斯噪声, $n_a \sim \text{CN}(0, \sigma_a^2)$ 。

根据下行NOMA协议的SIC解码顺序, Alice解码 x_b 后解码 x_a , Alice解码 x_b 和 x_a 的SINR表示为

$$\gamma_{x_i}^{\text{BA}} = \frac{\alpha_i P_{\text{BS}} |\hat{h}_{\text{ra}} \Theta_A \hat{h}_{\text{br}} + \hat{g}_{\text{ba}}|^2}{\xi \alpha_j P_{\text{BS}} |\hat{h}_{\text{ra}} \Theta_A \hat{h}_{\text{br}} + \hat{g}_{\text{ba}}|^2 + \sigma_{\text{rcs}} P_A |f_{\text{ab}}|^2 |f_{\text{ba}}|^2 + \sigma_a^2 + \sigma_{\text{eba}}^2 P_{\text{BS}}} \quad (7)$$

其中, σ_{eba}^2 为BS与Alice之间级联信道的估计误差, $i, j \in \{a, b\}$ 且 $i \neq j$, 当 $i = b$ 时, 非完美SIC的系数 $\xi = 0$; 当 $i = a$ 时, ξ 取值为 $0 \leq \xi \leq 1$, 当 $\xi = 0$ 时代表完美SIC。

完成通信信号的解码后, Alice解码雷达回波信号, 此时的SINR为

$$\gamma_{x_r}^{\text{BA}} = \frac{\sigma_{\text{rcs}} P_A |f_{\text{ab}}|^2 |f_{\text{ba}}|^2}{\xi \alpha_b P_{\text{BS}} |\hat{h}_{\text{ra}} \Theta_A \hat{h}_{\text{br}} + \hat{g}_{\text{ba}}|^2 + \psi \alpha_a P_{\text{BS}} |\hat{h}_{\text{ra}} \Theta_A \hat{h}_{\text{br}} + \hat{g}_{\text{ba}}|^2 + \sigma_a^2 + \sigma_{\text{eba}}^2 P_{\text{BS}}} \quad (8)$$

其中, ψ 为非完美SIC的系数 ($0 \leq \psi \leq 1$), 当 $\psi = 0$ 时代表完美SIC。

3 系统通信性能分析

本节分析了RIS辅助下行SWIPT-NOMA通感一体化系统通信性能, 推导了Bob和Alice的OP, ER的表达式。

3.1 中断性能分析

(1) Bob的中断。根据NOMA协议, 当Bob无法成功解码 x_b 时便发生了中断, 此时Bob的OP表示为

$$P_{\text{out}}^{\text{Bob}} = 1 - \Pr(\gamma_{x_b}^{\text{BB}} > \gamma_{\text{thb}}) \quad (9)$$

其中, γ_{thb} 为解码 x_b 的目标SINR; 将式(5)代入式(9)可推导出, Bob的OP具体表达式为

$$P_{\text{out}}^{\text{Bob}} = 1 + \frac{(Q_1 Q_3 H)^2}{Q_2 \lambda_{\text{ab}} \gamma_{\text{thb}} \eta \rho (\gamma_{\text{thb}} \eta \rho \sigma_{\text{eba}}^2 \lambda_{\text{ab}} + Q_1 Q_3 H)} \cdot E_i(-Q) e^{Q - \frac{\gamma_{\text{thb}} (\sigma_b^2 + \sigma_{\text{ebb}}^2 P_{\text{BS}})}{Q_1 Q_3 P_{\text{BS}}}} \quad (10)$$

其中, $Q_1 = N \lambda_{\text{rb}} \lambda_{\text{br}} + \lambda_{\text{gbb}}$, $Q_2 = N \lambda_{\text{ra}} \lambda_{\text{br}} + \lambda_{\text{gba}}$, $Q_3 = \alpha_b - \gamma_{\text{thb}} \alpha_a$, $H = 4\pi d^2 (1 - \rho)$, λ_{br} , λ_{rb} , λ_{ra} , λ_{ab} , λ_{ba} , λ_{gbb} , λ_{gba} 分别为信道 $\hat{h}_{\text{br}}$, $\hat{h}_{\text{rb}}$, $\hat{h}_{\text{ra}}$, f_{ab} , f_{ba} , $\hat{g}_{\text{bb}}$, $\hat{g}_{\text{ba}}$ 的方差, $Q = Q_1 Q_3 H / (Q_2 \lambda_{\text{ab}} \gamma_{\text{thb}} \eta \rho)$ 。当 $0 < \gamma_{\text{thb}} < \alpha_b / \alpha_a$ 时, Bob的OP表示为式(10), 当 $\gamma_{\text{thb}} > \alpha_b / \alpha_a$ 时, $P_{\text{out}}^{\text{Bob}} = 1$ 。

(2) Alice的中断。Alice发生中断分为两种情况: (a) Alice未能成功解码 x_b ; (b) Alice成功解码 x_b , 但未能成功解码自己的信息 x_a , 故Alice的OP可以表示为

$$P_{\text{out}}^{\text{BA}} = 1 - \Pr(\gamma_{x_b}^{\text{BA}} > \gamma_{\text{thb}}, \gamma_{x_a}^{\text{BA}} > \gamma_{\text{tha}}) \quad (11)$$

其中, γ_{tha} 为解码 x_a 的目标SINR。将式(7)代入式(11), 则Alice的OP具体表达式为

$$P_{\text{out}}^{\text{Alice}} = 1 - \frac{\pi M_1}{N_1 \lambda_{\text{ab}} \lambda_{\text{ba}}} \sum_{n=0}^{N_1} e^{-\frac{\Delta \sigma_{\text{rcs}} P_{\text{BS}} \eta \rho \sigma_{\text{eba}}^2 \theta_1 + \Delta G}{Q_2 (1 - \Delta \sigma_{\text{rcs}} P_{\text{BS}} \eta \rho \theta_1)}} \cdot K_0 \left(2 \sqrt{\frac{\theta_1}{\lambda_{\text{ab}} \lambda_{\text{ba}}}} \right) \sqrt{1 - \delta_n^2} \quad (12)$$

其中, $G = (\sigma_a^2 + \sigma_{\text{eba}}^2 P_{\text{BS}}) H$, $M_1 = 1 / (\Delta \sigma_{\text{rcs}} P_{\text{BS}} \eta \rho)$, $\Delta = \max(\Delta_1, \Delta_2)$, $\Delta_1 = \gamma_{\text{thb}} / ((\alpha_b - \gamma_{\text{thb}} \alpha_a) P_{\text{BS}} H)$, $\Delta_2 = \gamma_{\text{tha}} / ((\alpha_a - \gamma_{\text{tha}} \xi \alpha_b) P_{\text{BS}} H)$, $\theta_1 = M_1 (\delta_n + 1) / 2$, $\delta_n = \cos[(2n - 1)\pi / (2N_1)]$ 。当 $|f_{\text{ab}}|^2 |f_{\text{ba}}|^2 < M_1$ 时, Alice的中断概率表示为式(12), 当 $|f_{\text{ab}}|^2 |f_{\text{ba}}|^2 > M_1$ 时, $P_{\text{out}}^{\text{Alice}} = 1$ 。

3.2 遍历速率性能分析

(1) Bob的遍历速率。Bob的遍历速率表达式可表示为

$$R_{B, x_b}^{(e)} = E[B_c \log_2(1 + \gamma_{x_b}^{\text{BB}})] \quad (13)$$

令 $\phi = \gamma_{x_b}^{\text{BB}}$, Bob的遍历速率可以表示为

$$\begin{aligned} R_{B, x_b}^{(e)} &= E[B_c \log_2(1 + \gamma_{x_b}^{\text{BB}})] \\ &= B_c \int_0^{+\infty} \log_2(1 + \phi) f(\phi) d\phi \\ &= \frac{B_c}{\ln 2} \int_0^{+\infty} \frac{1 - F(\phi)}{1 + \phi} d\phi \end{aligned} \quad (14)$$

B_c 和 B_s 分别表示系统用于通信和雷达感知的带宽, 满足 $B_c + B_s = B$, B 为系统的总带宽; $f(\phi)$

和 $F(\phi)$ 分别为 ϕ 的概率密度函数和累积分布函数。式(14)中 $F(\phi)$ 的表达式为

$$F(\phi) = \Pr \left(\frac{\alpha_b P_{BS} |\hat{h}_{rb} \Theta_B \hat{h}_{br} + \hat{g}_{bb}|^2}{\alpha_a P_{BS} |\hat{h}_{rb} \Theta_B \hat{h}_{br} + \hat{g}_{bb}|^2 + P_A |f_{ab}|^2 + \sigma_b^2 + \sigma_{ebb}^2 P_{BS}} < \phi \right) \quad (15)$$

将信道概率密度函数代入式(15), 计算得到 $F(\phi)$ 的具体表达式为

$$F(\phi) = 1 + Q_4 e^{Q_4 - \frac{\phi(\sigma_b^2 + \sigma_{ebb}^2 P_{BS})}{Q_1(\alpha_b - \phi\alpha_a)P_{BS}}} \cdot E_i(-Q_4) \frac{Q_1(\alpha_b - \phi\alpha_a)H}{\phi\eta\rho\sigma_{eba}^2\lambda_{ab} + Q_1(\alpha_b - \phi\alpha_a)H} \quad (16)$$

其中, $Q_4 = Q_1(\alpha_b - \phi\alpha_a)H / (Q_2\lambda_{ab}\phi\eta\rho)$; 将式(16)代入式(14)中, 应用高斯-切比雪夫公式计算得到式(17), 其中, $Q_5 = Q_1(\alpha_b - \theta_2\alpha_a)H / (Q_2\lambda_{ab}\eta\rho\theta_2 \cdot (1 + \theta_2))$, $\theta_2 = M_2(\delta_n + 1)/2$, $M_2 = \alpha_b/\alpha_a$, $\delta_n = \cos[(2n-1)\pi/2N_2]$

$$R_{B,x_b}^{(e)} = -\frac{\pi B_c M_2}{2 \ln 2 N_2} \sum_{n=0}^{N_2} Q_5 e^{Q_5 - \frac{\theta_2 \sigma_b^2}{Q_1 P_{BS}(\alpha_b - \theta_2 \alpha_a)}} \cdot E_i(-Q_5) \sqrt{1 - \delta_n^2} \quad (17)$$

(2) Alice的遍历速率。Alice的遍历速率表达式为

$$R_{A,x_a}^{(e)} = E[B_c \log_2(1 + \gamma_{x_a}^{BA})] \quad (18)$$

类比于Bob的遍历速率的求解过程, 当满足 $|f_{ab}|^2 |f_{ba}|^2 > M_5$ 时, Alice的ER表达式为式(19), 当 $|f_{ab}|^2 |f_{ba}|^2 < M_5$, Alice的ER为0, 式(19)中, M_3 和 M_4 为采用高斯-切比雪夫时所取的上限值, $M_5 = (\alpha_a - \xi\alpha_b\theta_4)H / (\theta_4\sigma_{rcs}\eta\rho)$,

$$T_A = \begin{cases} P_{BS} \left(|\hat{h}_{ra} \Theta_A \hat{h}_{br} + \hat{g}_{ba}|^2 + \sigma_{eba}^2 \right) + \sigma_a^2, & H_0 \\ P_{BS} \left(|\hat{h}_{ra} \Theta_A \hat{h}_{br} + \hat{g}_{ba}|^2 + \sigma_{eba}^2 \right) + P_A \sigma_{rcs} |f_{ab}|^2 |f_{ba}|^2 + \sigma_a^2, & H_1 \end{cases} \quad (20)$$

其中, H_0 表示未接收到回波的情况, H_1 表示接收到的信息包含回波、干扰和噪声的情况, D_0 和 D_1 依次是判断Alice未接收到和接收到雷达回波的2元决策, 其判决准则为

$$T_A \underset{D_0}{\overset{D_1}{\geq}} \tau \quad (21)$$

其中, τ 为Alice的成功检测阈值, Alice对Bob的成功检测概率 P_D 可以表示为

$$P_D = \Pr\{D_1 | H_1\} = \Pr\left\{P_{BS} \left(|\hat{h}_{ra} \Theta_A \hat{h}_{br} + \hat{g}_{ba}|^2 + \sigma_{eba}^2 \right) + P_A \sigma_{rcs} |f_{ab}|^2 |f_{ba}|^2 + \sigma_a^2 > \tau\right\} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= M_3(\delta_k + 1)/2, & \theta_4 &= M_4(\delta_n + 1)/2, \\ \theta_5 &= M_5(\delta_l + 1)/2, \\ B_1 &= (\theta_4 \sigma_{rcs} \cdot P_{BS} \eta \rho \sigma_{eba}^2 \theta_3 + \theta_4 G) / C_1, \\ C_1 &= Q_2(\alpha_a - \theta_4 \xi \alpha_b) P_{BS} H - \theta_4 \sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \theta_3, \\ B_2 &= (\theta_4 \sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \sigma_{eba}^2 \theta_5 + \theta_4 G) / C_2, \\ C_2 &= Q_2(\alpha_a - \theta_4 \xi \alpha_b) P_{BS} H - \theta_4 \sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \theta_5 \end{aligned}$$

$$R_{A,x_a}^{(e)} = \frac{\pi^2 M_4 B_c}{2 \ln 2 N_4 \lambda_{ab} \lambda_{ba}} \sum_{n=0}^{N_4} \frac{\sqrt{1 - \delta_n^2}}{(1 + \theta_4)} \cdot \left(\frac{M_3}{K} \sum_{k=0}^K e^{-B_1} K_0 \left(2 \sqrt{\frac{\theta_3}{\lambda_{ab} \lambda_{ba}}} \right) \sqrt{1 - \delta_k^2} + \frac{M_5}{L} \sum_{l=0}^L (1 - e^{-B_2}) K_0 \left(2 \sqrt{\frac{\theta_5}{\lambda_{ab} \lambda_{ba}}} \right) \cdot \sqrt{1 - \delta_l^2} \right) \quad (19)$$

4 系统感知性能分析

在系统感知性能方面, 本节推导了Alice对Bob的检测概率以及遍历雷达估计信息速率的表达式。

4.1 检测性能分析

对感知而言, 接收回波是所需信号、干扰和噪声的混合, 目标的存在与否可以通过接收信号的功率来判断。Alice在一段时间内接收到的平均功率 T_A 表示为

将信道概率密度函数代入式(22)推导得出, Alice的 P_D 具体表达式为

$$P_D = \frac{\pi M_6}{\lambda_{ab} \lambda_{ba} N_6} \sum_{n=0}^{N_6} e^{-\frac{4\pi d^2(1-\rho)(\tau - \sigma_a^2 - \sigma_{eba}^2 P_{BS} - \sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \sigma_{eba}^2 \theta_6)}{Q_2(P_{BS} 4\pi d^2(1-\rho) + \sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \theta_6)}} \cdot K_0 \left(2 \sqrt{\frac{\theta_6}{\lambda_{ab} \lambda_{ba}}} \right) \sqrt{1 - \delta_n^2} \quad (23)$$

其中, M_6 为采用高斯-切比雪夫时所取的上限值, $\theta_6 = M_6(\delta_n + 1)/2$ 。

4.2 遍历雷达估计信息速率分析

对接收到的雷达回波, 采用REIR^[33]指标来评估雷达目标感知的性能。REIR类似于通信系统的数据信息速率, 较高的REIR值意味着较好的雷达

探测性能。REIR与回波信噪比 $\gamma_{x_r}^{BA}$ 之间的关系式表示为式(24)，其中， κ 为雷达占空比， $\kappa = T_p/T'$ ， T_p 为雷达脉冲持续时间， T' 为一个脉冲周期， $T' = 1/B_s$

$$R_r = E \left[\frac{B_s}{2} \log_2 (1 + 2\kappa\gamma_{x_r}^{BA}) \right] \quad (24)$$

令 $\theta = 2\kappa\gamma_{x_r}^{BA}$ ，式(24)可表示为 $R_r = B_s/2 \times E[\log_2(1 + \theta)]$ ，类比于Bob遍历速率的求解过程，经过推导可得出REIR的具体表达式为

$$R_r = \frac{\pi^2 M_7 B_s}{4 \ln 2 N \lambda_{ab} \lambda_{ba}} \sum_{n=0}^N \frac{\sqrt{1 - \delta_n^2}}{(1 + \theta_7)} \cdot \left(\frac{M_8}{K} \sum_{k=0}^K e^{-B_3} K_0 \left(2 \sqrt{\frac{\theta_8}{\lambda_{ab} \lambda_{ba}}} \right) \sqrt{1 - \delta_k^2} \right. \\ \left. + \frac{M_9}{L} \sum_{l=0}^L (1 - e^{-B_4}) K_0 \left(2 \sqrt{\frac{\theta_9}{\lambda_{ab} \lambda_{ba}}} \right) \sqrt{1 - \delta_l^2} \right) \quad (25)$$

其中， M_7 和 M_8 为采用高斯-切比雪夫时所取的上限值， $B_3 = (\sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \sigma_{eba}^2 \theta_7 \theta_8 + \theta_7 G)/C_3$ ， $B_4 = (\sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \sigma_{eba}^2 \theta_7 \theta_9 + \theta_6 G)/C_4$ ， $\theta_7 = M_7(\delta_n + 1)/2$ ， $\theta_8 = M_8(\delta_k + 1)/2$ ， $\theta_9 = M_9(\delta_l + 1)/2$ ， $C_3 = Q_2(2\kappa \cdot \sigma_{rcs} P_{BS} \eta \rho \theta_8 - (\xi \alpha_b + \psi \alpha_a) P_{BS} H \theta_7)$ ， $C_4 = Q_2(2\kappa \sigma_{rcs} \cdot P_{BS} \eta \rho \theta_9 - (\xi \alpha_b + \psi \alpha_a) P_{BS} H \theta_7)$ ， $M_9 = (\xi \alpha_b + \psi \alpha_a) \cdot H/(2\kappa \sigma_{rcs} \eta \rho)$ ，当满足 $|f_{ab}|^2 |f_{ba}|^2 > M_9$ 时，Alice的REIR表达式为式(25)，当 $|f_{ab}|^2 |f_{ba}|^2 < M_9$ ， $R_r = 0$ 。

5 仿真结果及分析

本节通过仿真来验证理论推导的正确性并分析系统通信性能和感知性能，仿真结果基于 10^5 蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟得到。除非另有说明，否则均遵循以下系统仿真参数设置：信道估计参数

$\lambda_{br} = 0.3$ ， $\lambda_{rb} = 0.3$ ， $\lambda_{gbb} = 0.5$ ， $\lambda_{ra} = 0.4$ ， $\lambda_{gba} = 0.2$ ， $\lambda_{ab} = \lambda_{ba} = 0.2$ ，功率分配因子 $\alpha_a = 0.3$ ， $\alpha_b = 0.7$ ，信道估计误差 $\sigma_{ebb}^2 = \sigma_{eba}^2 = 0.01$ ，噪声功率 $\sigma_b^2 = \sigma_a^2 = -10$ dB，系统的总带宽 $B = 10$ MHz，通信带宽 $B_c = 6$ MHz，雷达带宽 $B_s = 4$ MHz，雷达横截面 $\sigma_{rcs} = 100$ ，雷达占空比 $\kappa = 0.1$ ，RIS元件个数 $N = 128$ ，Alice与Bob之间的距离 $d = 5$ m，能量收集系数 $\eta = 0.8$ ，时间分配因子 $\rho = 0.3$ ，目标SINR参数 $\gamma_{thb} = 1.5$ ， $\gamma_{tha} = 2$ ，非完美SIC系数 $\xi = \psi = 0.01$ 。

图1(a)绘制了用户的OP与BS发射功率关系的曲线图，其中考虑了两种情况来对比，理想和理想情况下参数设置分别表示为 $\sigma_{ebb}^2 = \sigma_{eba}^2 = 0$ ， $\xi = \psi = 0$ 和 $\sigma_{ebb}^2 = \sigma_{eba}^2 = 0.01$ ， $\xi = \psi = 0.01$ 。通过观察图1(a)发现，Alice和Bob的OP均随着BS发射功率的增大而减小，并且在高信噪比区域，分别逐渐趋于一个非0常数，并且理想情况下的中断性能都是优于非理想情况的，说明非完美SIC和CEE的存在总是不利于系统的可靠性性能。

图1(b)刻画了两种信道模型下，用户的OP随BS发射功率变化的曲线图，信道估计误差分别为：(1) $\sigma_{ebb}^2 = \sigma_{eba}^2 = 0.01$ ；(2) $\sigma_{ei}^2 = \Omega_i/(1 + \delta\gamma\Omega_i)$ ， $\delta = \{1, 0.1\}$ 。观察图1(b)发现，当BS发射功率增大时，Alice和Bob的OP都下降， δ 等于0.1的曲线位于 δ 等于1的曲线上方， δ 越小代表着CEE参数越大，系统的中断概率越高，系统可靠性就越得不到保障。

图1(c)描绘了处于不同BS发射功率下，用户的OP随时间分配因子 ρ 变化的曲线图，观察图形走向可以看到随着 ρ 的增大，用于能量收集所占的时间就越长，OP也就越高，意味着OP性能的下降。对比图中的蓝红黑3条曲线发现，随着BS发射功率的

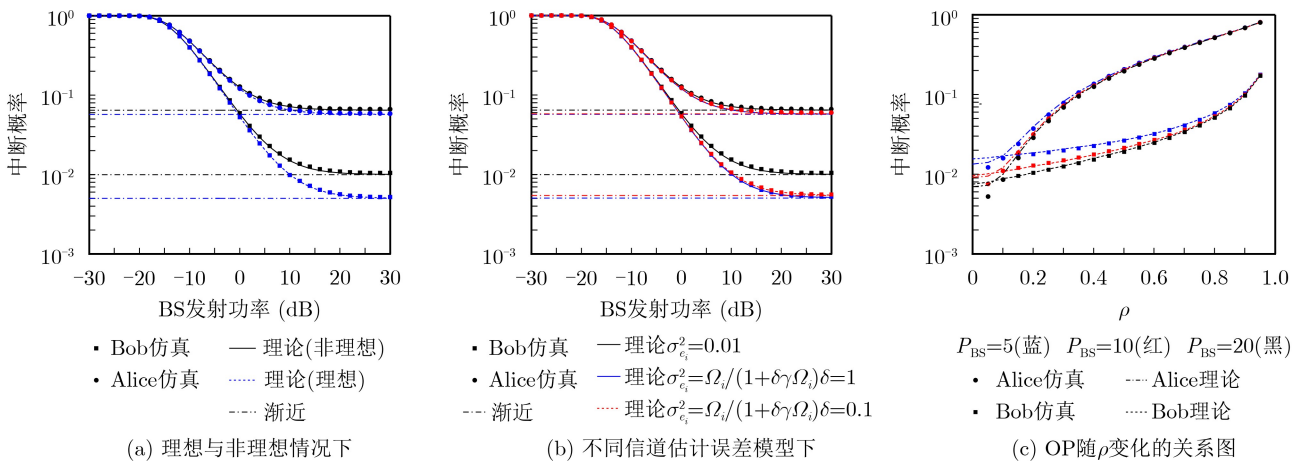


图 1 3种不同情况下用户的中断概率图

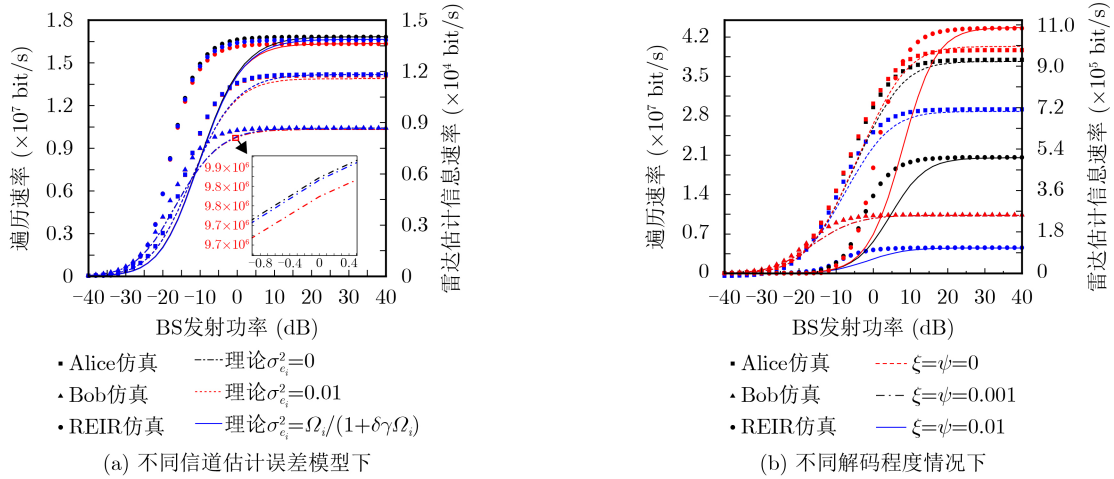


图2 用户的遍历速率和REIR图

增大, OP会逐渐减小。

图2(a)刻画了不同信道估计误差模型下Bob, Alice的遍历速率和Alice的REIR性能图, 设置 $d = 20$ m并考虑了两类CEE取值情况: (1) $\sigma_{e_i}^2 = \{0, 0.01\}$; (2) $\sigma_{e_i}^2 = \Omega_i / (1 + \delta\gamma\Omega_i)$, 此时 δ 取值为0.1。图中理论与仿真在高信噪比情况的重合表示了推导的准确性, 观察图中曲线趋势发现, Bob, Alice的遍历速率和Alice的REIR均随BS发射功率增大而增加, 并最终趋于一个定值; 进一步观察图中放大图发现, 随着信道估计误差的逐渐增大, 用户的遍历速率和REIR都会相应的降低。

图2(b)展示了不同解码程度下Bob, Alice的遍历速率和Alice的REIR性能图, 设置参数 $d = 20$ m和3组SIC系数 $\xi = \psi = \{0, 0.001, 0.01\}$ 。观察图中曲线发现, Bob, Alice的遍历速率和Alice的REIR均随BS发射功率增大而增加, 进一步观察发现, Bob, Alice的遍历速率均随着非完美SIC系数的增大而减小, Alice的REIR也随非完美SIC系数的增大而减小, 且在Alice处形成速率下降的影响更为显著。

图3刻画了检测阈值分别为 $\tau = \{20, 40, 60\}$ 情况下, Alice对Bob的检测概率随BS发射功率变化的曲线图。观察图形可以看到, 图中理论与仿真曲线的高度重合验证了推导的准确性, 检测概率随BS发射功率的增大而增大; 对比图中的蓝红黑3条曲线发现, 随着 τ 取值的不断增大, Alice对Bob的检测概率会相应的逐渐降低。

图4刻画了联合雷达检测和通信覆盖概率图, 联合了Bob和Alice的通信中断和Alice对Bob的检测性能, 表达式为 $JRDCCP = (T_A > \tau; \gamma_{x_b}^{BA} > \gamma_{thb}; \gamma_{x_a}^{BA} > \gamma_{tha} | H_1)$ 。分别从中断阈值和检测阈值对JRDCCP的影响进行分析, 在低检测阈值 $\tau = -10$ 处易观察JRDCCP随中断阈值的变化情况, 随着

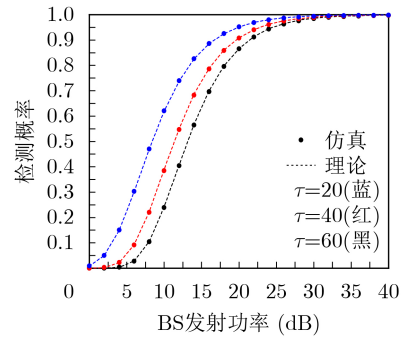


图3 不同检测阈值下用户的检测概率图

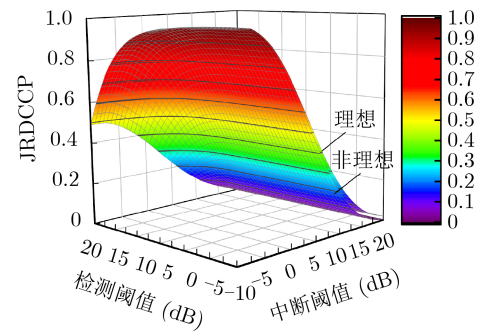


图4 理想和理想情况下的JRDCCP

中断阈值的升高, 图形覆盖概率也会相应的降低, 同理, 随着检测阈值的升高, 图形覆盖概率会相应的降低; 对比理想和理想情况下的图形发现, 非理想情况下的JRDCCP一直处于理想情况曲线的下方, 表明了非完美SIC和CEE的存在使系统的JRDCCP性能有所下降。

6 结论

本文提出了RIS辅助的SWIPT-NOMA通感一体化系统, 本系统同时实现目标感知和信息传输。在考虑非完美SIC和两种CEE模型情况下, 分析了该系统的通信可靠性、有效性和雷达感知性能, 推

导出OP, ER, 检测概率以及REIR的解析表达式, 并对理论分析进行了仿真验证, 同时对系统JRDCCP性能进行了仿真分析, 验证了非完美SIC和CEE的存在会对系统的通信和感知性能产生不利影响。

参 考 文 献

- [1] LIU Ruiqi, LIN Hui, LEE H, *et al.* Beginning of the journey toward 6G: Vision and framework[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(10): 8–9. doi: [10.1109/MCOM.2023.10298069](https://doi.org/10.1109/MCOM.2023.10298069).
- [2] ZHANG Haijun, WANG Dong, WU Shuqing, *et al.* USTB 6G: Key technologies and metaverse applications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(5): 112–119. doi: [10.1109/MWC.012.2300077](https://doi.org/10.1109/MWC.012.2300077).
- [3] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
XIAO Bo, HUO Kai, and LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
- [4] HUANG Tianyao, SHLEZINGER N, XU Xingyu, *et al.* MAJoRCom: A dual-function radar communication system using index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3423–3438. doi: [10.1109/TSP.2020.2994394](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2994394).
- [5] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU Kai, *et al.* Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(1): 306–345. doi: [10.1109/COMST.2021.3122519](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3122519).
- [6] LI Xingwang, LI Jingjing, LIU Yuanwei, *et al.* Residual transceiver hardware impairments on cooperative NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(1): 680–695. doi: [10.1109/TWC.2019.2947670](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2947670).
- [7] LIN Zhi, NIU Hehao, AN Kang, *et al.* Pain without gain: Destructive beamforming from a malicious RIS perspective in IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(5): 7619–7629. doi: [10.1109/JIOT.2023.3316830](https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3316830).
- [8] CHEN Xiaoming, NG D W K, and CHEN H H. Secrecy wireless information and power transfer: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 54–61. doi: [10.1109/MWC.2016.7462485](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7462485).
- [9] XIAO Zhiqiang and ZENG Yong. Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1823–1837. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155509](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155509).
- [10] OUYANG Chongjun, LIU Yuanwei, and YANG Hongwen. MIMO-ISAC: Performance analysis and rate region characterization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(4): 669–673. doi: [10.1109/LWC.2023.3238842](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3238842).
- [11] OUYANG Chongjun, LIU Yuanwei, YANG Hongwen, *et al.* Integrated Sensing and Communications: A Mutual Information-Based Framework[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(5): 26–32. doi: [10.1109/MCOM.001.2200493](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200493).
- [12] ZHUO Yinxiao and WANG Zhaocheng. Performance analysis of ISAC system under correlated communication-sensing channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(12): 16823–16827. doi: [10.1109/TVT.2023.3294502](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3294502).
- [13] ZHANG Chao, YI Wenqiang, LIU Yuanwei, *et al.* Semi-integrated-sensing-and-communication (Semi-ISaC): From OMA to NOMA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(4): 1878–1893. doi: [10.1109/TCOMM.2023.3241940](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3241940).
- [14] WANG Zhaolin, LIU Yuanwei, MU Xidong, *et al.* NOMA inspired interference cancellation for integrated sensing and communication[C]. ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications, Seoul, Korea, Republic of, 2022: 3154–3159. doi: [10.1109/ICC45855.2022.9839026](https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9839026).
- [15] 王夕予, 许晓明, 陈亚军. 非理想连续干扰消除下非正交多址接入上行传输系统性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(12): 2795–2801. doi: [10.11999/JEIT181165](https://doi.org/10.11999/JEIT181165).
WANG Xiyu, XU Xiaoming, and CHEN Yajun. Performances analysis in uplink non-orthogonal multiple access system with imperfect successive interference cancellation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 2795–2801. doi: [10.11999/JEIT181165](https://doi.org/10.11999/JEIT181165).
- [16] LI Xingwang, ZHANG Junyao, and HAN Congzheng, *et al.* Reliability and security of CR-STAR-RIS-NOMA assisted IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023. doi: [10.1109/JIOT.2023.334037110](https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.334037110).
- [17] MU Xidong, LIU Yuanwei, GUO Li, *et al.* NOMA-aided joint radar and multicast-unicast communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1978–1992. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155524](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155524).
- [18] WANG Zhaolin, LIU Yuanwei, MU Xidong, *et al.* NOMA empowered integrated sensing and communication[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(3): 677–681. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3140271](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3140271).
- [19] OUYANG Chongjun, LIU Yuanwei, and YANG Hongwen. Revealing the impact of SIC in NOMA-ISAC[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(10): 1707–1711. doi: [10.1109/LWC.2023.3288633](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3288633).

- [20] OUYANG Chongjun, LIU Yuanwei, and YANG Hongwen. On the performance of uplink ISAC systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(8): 1769–1773. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3178193](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3178193).
- [21] LIU Rang, LI Ming, LUO Honghao, *et al.* Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: Opportunities, applications, and future directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(1): 50–57. doi: [10.1109/MWC.002.2200206](https://doi.org/10.1109/MWC.002.2200206).
- [22] LIN Zhi, NIU Hehao, AN Kang, *et al.* Refracting RIS-aided hybrid satellite-terrestrial relay networks: Joint beamforming design and optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(4): 3717–3724. doi: [10.1109/TAES.2022.3155711](https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3155711).
- [23] CHEPURI S P, SHLEZINGER N, LIU Fan, *et al.* Integrated sensing and communications with reconfigurable intelligent surfaces: From signal modeling to processing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2023, 40(6): 41–62. doi: [10.1109/MSP.2023.3279986](https://doi.org/10.1109/MSP.2023.3279986).
- [24] XING Zhe, WANG Rui, and YUAN Xiaojun. Joint active and passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface enabled integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(4): 2457–2474. doi: [10.1109/TCOMM.2023.3244246](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3244246).
- [25] WANG Xinyi, FEI Zesong, HUANG Jingxuan, *et al.* Joint waveform and discrete phase shift design for RIS-assisted integrated sensing and communication system under Cramer-Rao bound constraint[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(1): 1004–1009. doi: [10.1109/TVT.2021.3122889](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3122889).
- [26] YANG Ping, YANG Liang, and WANG Shanjin. Performance analysis for RIS-aided wireless systems with imperfect CSI[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(3): 588–592. doi: [10.1109/LWC.2021.3136930](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3136930).
- [27] 崔苗, 喻鑫, 李学易, 等. 多用户多载波无线携能通信系统的上下行联合资源分配[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(6): 1359–1364. doi: [10.11999/JEIT180762](https://doi.org/10.11999/JEIT180762).
- CUI Miao, YU Xin, and LI Xueyi, *et al.* Joint downlink and uplink resource allocation for multi-user multi-carrier simultaneous wireless information and power transfer systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1359–1364. doi: [10.11999/JEIT180762](https://doi.org/10.11999/JEIT180762).
- [28] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously[C]. 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, 2008: 1612–1616. doi: [10.1109/ISIT.2008.4595260](https://doi.org/10.1109/ISIT.2008.4595260).
- [29] LIU Chengpeng, ZHANG Lin, CHEN Zhi, *et al.* Outage probability analysis in downlink SWIPT-assisted cooperative NOMA systems[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2022, 7(1): 72–87. doi: [10.23919/JCIN.2022.9745483](https://doi.org/10.23919/JCIN.2022.9745483).
- [30] ZHANG Guoan, GU Xiaohui, DUAN Wei, *et al.* Hybrid time-switching and power-splitting EH relaying for RIS-NOMA downlink[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2023, 9(1): 146–158. doi: [10.1109/TCCN.2022.3216406](https://doi.org/10.1109/TCCN.2022.3216406).
- [31] DING Zhiguo, SCHÖBER R, and POOR H V. On the impact of phase shifting designs on IRS-NOMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(10): 1596–1600. doi: [10.1109/LWC.2020.2991116](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2991116).
- [32] KRIKIDIS I, TIMOTHEOU S, NIKOLAOU S, *et al.* Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(11): 104–110. doi: [10.1109/MCOM.2014.6957150](https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6957150).
- [33] CHIRIYATH A R, PAUL B, JACYNA G M, *et al.* Inner bounds on performance of radar and communications co-existence[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(2): 464–474. doi: [10.1109/TSP.2015.2483485](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2483485).
- 李兴旺: 男, 副教授, 研究方向为新一代宽带移动通信系统的新理论及技术。
- 王新莹: 女, 硕士生, 研究方向为新一代无线通信技术。
- 田心记: 女, 副教授, 研究方向为新一代宽带移动通信系统的新理论及技术。
- 王心水: 男, 副教授, 研究方向为5G通信中的大规模MIMO通信理论、能效通信和物理层安全等。
- 秦攀科: 男, 副教授, 研究方向为软件定义光网络、人工智能、云计算和大数据等。
- 陈 慧: 女, 讲师, 研究方向为新一代无线通信技术、图像处理。

责任编辑: 余 蓉