



研究与开发

基于硬件损伤的修改转发协作NOMA系统的物理层安全

叶明珠, 李光球, 张旭, 高杰, 王志康

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对解码转发 (decode-and-forward, DF) 协作非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 系统物理层安全 (physical layer security, PLS) 性能较差, 以及实际收发信机中器件存在的硬件损伤问题, 提出了一种在多窃听场景中合法、窃听用户的收发设备中均存在硬件损伤的修改转发 (modify-and-forward, MF) 协作 NOMA 系统 PLS 模型, 并研究在发送端采用发射天线选择 (transmit antenna selection, TAS) 来改善在 Nakagami-m 衰落信道上的 PLS 性能。利用高斯-切比雪夫正交定理推导了采用 TAS 的 MF-NOMA 系统的安全中断概率、渐近安全中断概率和严格正安全容量的近似表达式。MF-NOMA 系统的安全中断概率和严格正安全容量的数值计算结果与仿真结果一致, 同时表明在相同的硬件损伤下 MF-NOMA 系统的 PLS 性能优于 DF-NOMA 系统; 基站发射天线数越多、窃听数越少, 则 MF-NOMA 系统的 PLS 性能越好; 硬件损伤对 MF-NOMA 的 PLS 性能的恶化程度主要与各硬件损伤系数和各链路的平均信噪比有关, 且随硬件损伤所在节点的不同而程度各异。

关键词: 修改转发; 非正交多址接入; 硬件损伤; 发射天线选择; 物理层安全

中图分类号: TN918.1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025130

Physical layer security of modify-and-forward cooperative NOMA system based on hardware impairments

YE Mingzhu, LI Guangqiu, ZHANG Xu, GAO Jie, WANG Zhikang

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: In the view of poor physical layer security (PLS) performance of decode-and-forward (DF) cooperative non-orthogonal multiple access (NOMA) systems and the problem of hardware impairments in actual transceiver devices, a PLS model for a modify-and-forward (MF) cooperative NOMA system was proposed. In this model, hardware impairments exist in the transmitting and receiving devices of both legitimate and eavesdropping users in a multi-eavesdropping scenario. The transmit antenna selection (TAS) technique is employed at the transmitter to improve its PLS performance over the Nakagami-m fading channel. The approximate expressions for the secure outage probability, asymptotic secure outage probability, and strictly positive secrecy capacity of the MF-NOMA system with TAS

收稿日期: 2025-02-24; 修回日期: 2025-04-02

通信作者: 李光球, gqli@hdu.edu.cn



were derived by using the Gaussian-Chebyshev quadrature theorem. The numerical calculation results of the secure outage probability and strictly positive secrecy capacity of the MF-NOMA system were consistent with the simulation results. The results show that under the same hardware impairments, the PLS performance of the MF-NOMA system outperforms that of the DF-NOMA system. The more transmit antennas of the base station has, the fewer eavesdroppers exist, the better the PLS performance of MF-NOMA system is. The degree of degradation of the MF-NOMA's PLS performance caused by hardware impairments is mainly related to each hardware impairment coefficient and the average signal-to-noise ratio of each link, and varies depending on the node where the hardware impairment is located.

Key words: MF, NOMA, hardware impairments, TAS, PLS

0 引言

非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术可以显著地提高无线网络的频谱效率, 满足下一代移动通信的海量连接需求, 被视为 6G 中有前景的多址接入技术之一^[1-2]。NOMA 技术既可应用于蜂窝移动通信系统的下行链路, 也可应用于上行链路^[3], 本文针对下行链路进行研究。文献[4]推导了 NOMA 系统中远、近端用户的中断概率和总吞吐量闭合式。文献[5]推导了 NOMA 系统中近端用户存在不完美串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 时的和速率闭合式。采用发射天线选择 (transmit antenna selection, TAS) 技术可进一步提升 NOMA 系统的有效性和可靠性^[6-7]。文献[6]研究了 NOMA 系统中基站采用 TAS 技术的和速率问题, 结果表明基站采用 TAS 技术可以获得更高的 NOMA 系统和速率。文献[7]推导了 NOMA 系统基站采用 TAS、用户节点采用最大比合并时的中断概率闭合式。

在 NOMA 系统中, 如果基站和远、近端用户之间存在障碍物遮挡, 或者基站与边缘用户进行通信, 需要由中继转发, 才能实现 NOMA 系统的正常通信, 解码转发 (decode-and-forward, DF) 是常用的中继转发协议^[8-9]。文献[8]研究了 DF 协作 NOMA 系统在不同中继选择方案下的远、近端用户的误码率性能。文献[9]推导了 DF 协作 NOMA 系统的中断概率和渐近遍历和速率的闭合式。以上研究均关

于 NOMA 系统的可靠性或有效性, 物理层安全 (physical layer security, PLS) 性能近年来也备受关注^[10-12]。文献[10]推导了 DF 中继协作 NOMA 系统的安全中断概率 (secure outage probability, SOP) 和渐近 SOP 闭合式。文献[11]推导了多窃听场景中基站采用 TAS 技术的协作 NOMA 系统的 SOP 近似式。文献[12]推导了窃听者空间位置随机分布时, 采用 TAS 和功率分割策略的无线携能同传 NOMA 系统的 SOP 近似式。文献[10-12]研究的均是瑞利衰落信道, Nakagami-m 分布是更一般的衰落信道模型, 瑞利衰落是其特殊情况, 且还可以近似为莱斯衰落^[13]。文献[14]推导了 Nakagami-m 衰落信道上单入多出 NOMA 系统的 SOP 闭合式。文献[15]研究了多窃听场景中中继选择 DF 协作 NOMA 系统在 Nakagami-m 衰落信道上的 PLS 性能, 并推导了 SOP 和渐近 SOP 的闭合式。

针对 DF 协议的 SOP、严格正安全容量 (strictly positive secrecy capacity, SPSC) 性能不够理想, 文献[16]提出了性能更优的修改转发 (modify-and-forward, MF) 协议, MF 协议与 DF 协议的主要区别为第二时隙的信号处理方式: DF 协议中, 中继需解码并重新编码转发信号, 导致保密信号在二次传输时仍可能被窃听; MF 协议中, 中继基于信道状态信息修改信号, 并通过密钥将修改量传递给目的节点, 使其能正确解码, 而窃听者因无法获知修改量而难以破解, 从而显著提升了 PLS 性能。文献[17]推导了采用 MF 或 DF 协作的 NOMA 系统的 SOP, 渐近 SOP 和 SPSC 闭合式, 对比发现, 在提

高协作 NOMA 系统的 PLS 方面 MF 比 DF 更有优势。文献[18]推导了 MF 协作 NOMA 系统在不同中继选择方案下的 SOP 和渐近 SOP 表达式。

文献[1-18]均假设 NOMA 系统的收发信机为理想硬件设计，然而在实际中这是不可能实现的^[19-25]。硬件损伤 (hardware impairment, HI) 是不可避免的，例如，I/Q 失衡，放大器非线性和相位噪声^[19]，相位噪声损伤可建模为额外的噪声源^[19-25]。文献[19]推导了瑞利衰落信道上基站，远、近端用户均存在 HI 的 NOMA 系统的各用户的有效容量闭合式。文献[20]推导了瑞利衰落信道上基站、中继和远、近端用户等所有节点均存在 HI 的放大转发协作 NOMA 系统的中断概率闭合式。文献[21]推导了 Nakagami-m 衰落信道上基于 NOMA 的卫星-地面中继系统中卫星、中继和接收用户等所有节点均存在 HI 的远、近端用户的平均符号错误率的闭合式。文献[22]推导了 Nakagami-m 衰落信道上所有收发设备均存在 HI 的放大转发协作 NOMA 系统的中断概率闭合式。文献[19-22]研究了收发信机中存在的 HI 对通信传输系统有效性或可靠性的影响，最近，HI 对协作系统 PLS 性能的影响也受到关注^[23-25]。文献[23]推导了瑞利衰落信道上源节点、中继节点和目的节点均存在 HI 的 MF 中继选择系统的中断概率和截获概率闭合式。文献[24]推导了瑞利衰落信道上基站、中继、远、近端用户和窃听所有节点均存在 HI 的放大转发协作 NOMA 系统的 SOP 闭合式。文献[25]推导了 Nakagami-m 衰落信道下源节点、中继节点和目的节点均存在 HI 的多跳随机转发中继系统的非零安全容量闭合式。

综上，所有收发节点（包括合法收发者和窃听器）均存在 HI 的 MF 协作 NOMA 系统在 Nakagami-m 衰落信道上的 PLS 性能研究尚是一个开放课题，研究 HI 下的 MF 协作 NOMA 系统的 PLS 问题也面临着挑战，这是因为合法链路信噪比和窃听信噪比存在关联且硬件损伤下 MF-

NOMA 系统的 SOP 闭合式难以求解。针对上述挑战，本文将文献[17]的系统模型推广至所有收发节点均为非理想硬件设计的情况，并将文献[17]的瑞利衰落扩展到更一般的 Nakagami-m 衰落，提出了一种基于硬件损伤的 MF 协作 NOMA 系统 PLS 模型，同时在发射端采用 TAS 技术来改善 PLS 性能，推导 SOP、渐近 SOP 和 SPSC 渐近式，并与 DF-NOMA 系统的 PLS 性能进行比较，且用数值计算和仿真实验来验证。

1 系统模型

MF-NOMA 系统 PLS 模型如图 1 所示，由位于小区中心位置的基站 S、半双工 MF 中继 R、位于蜂窝边缘的 NOMA 近端用户 U_1 、远端用户 U_2 和 L 个被动窃听器 E_l ($l=1, 2, \dots, L$) 组成。S 配备 T 根天线并采用 TAS 技术发送叠加保密信号，其他节点均配备单根天线。参考文献[17, 24]，假定如下。

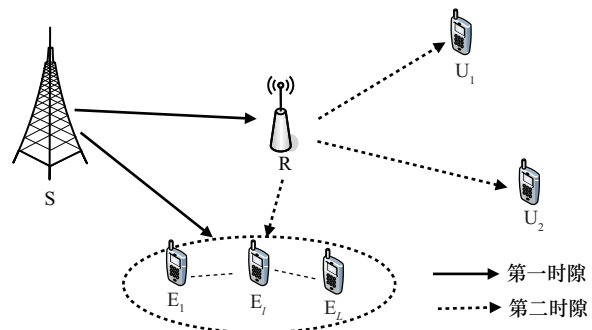


图1 MF-NOMA 系统 PLS 模型

(1) S 与 U_1 、 U_2 之间没有直连链路，需要由 R 辅助实现保密通信。

(2) R 和 U_1 具有理想的 SIC 技术， U_2 不具有 SIC 技术。

(3) S 的第 t 根天线到 R 的链路衰落系数为 $h_{S,R}$, $t \in \{1, 2, \dots, T\}$, $R \rightarrow U_1$ 、 $R \rightarrow U_2$ 、 $R \rightarrow E_l$ 和 $S \rightarrow E_l$ 链路的信道衰落系数分别为 h_{RU_1} 、 h_{RU_2} 、 h_{RE_l} 和 h_{E_l} ，均服从独立同分布且衰落系数为 m 的 Nakagami-m 衰落。



(4) $S \rightarrow R$ 、 $R \rightarrow U_1$ 、 $R \rightarrow U_2$ 、 $R \rightarrow E_l$ 、 $S \rightarrow E_l$

所有链路均具有理想的信道状态信息， $R \rightarrow E_l$ 、 $S \rightarrow E_l$ 窃听链路仅知统计特性。

(5) 主、窃链路的所有发送设备和接收设备中均存在硬件损伤，且均可建模为复高斯噪声。

(6) 节点 l 接收天线上的加性高斯白噪声 n_l 相互独立，且均服从 $CN(0, N_l)$ ， $l \in \{R, U_1, U_2, E_l\}$ 。

2 传输过程

整个通信传输过程分为两个时隙：第一时隙， S 选取使 $S \rightarrow R$ 链路信道衰落系数最大的天线发送信号，即 $|h_R|^2 = \arg \max_{t=1, \dots, T} |h_{S,R}|^2$ 。 S 向中继 R 发送的混合叠加信号为 $\sqrt{P_S \alpha_1} x_1 + \sqrt{P_S \alpha_2} x_2$ ， P_S 为 S 的发射功率， x_1 和 x_2 分别是 S 发送给 U_1 、 U_2 的保密信号， α_1 和 α_2 分别是 U_1 、 U_2 的功率分配系数，且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ， $\alpha_1 < \alpha_2$ 。 E_l 实施被动窃听；在第二时隙，中继 R 采用文献[16-18]中的 MF 协议前传保密信号，即 MF 中继将接收的信号解码并修改为 $\sqrt{P_R \alpha_1} x'_1 + \sqrt{P_R \alpha_2} x'_2$ 广播给用户 U_1 、 U_2 ， P_R 为 R 的发射功率。如引言所述， E_l 在此阶段不能实施窃听。

TAS 方案由于只使用一条射频链，因此，可以降低无线系统的功耗和实现复杂性，适用于 S 。采用文献[11]的 TAS 方案，首先， S 将正交导频序列逐一发送给 R 进行信道估计。然后， R 选择与最大信道衰落系数相关联的发射天线发射信号。

在第一时隙，受 HI 影响后，节点 j 的接收信号为：

$$y_j = h_j \left(\sqrt{P_S \alpha_1} x_1 + \sqrt{P_S \alpha_2} x_2 + \eta_{Sj} \right) + n_j \quad (1)$$

其中， $j \in \{R, E_l\}$ ， η_{Sj} 服从 $CN(0, k_{Sj}^2 P_S)$ ， $k_{Sj} = \sqrt{k_S^2 + k_j^2}$ 表示 $S \rightarrow j$ 链路的总体硬件损伤，由 S 的发送硬件损伤和 R 、 E_l 的接收硬件损伤构成， k_S 、 k_j 分别为其 HI 影响系数。

(1) 中继 R 的解码过程如下：首先将接收信号 x_1 视为干扰信号，并解码出 x_2 ，然后利用 SIC 技术将 x_2 从接收信号中消除，再解码出 x_1 。令 $g(c_1, b, \rho, h) = c_1 \rho |h|^2 / (b \rho |h|^2 + 1)$ ，在 R 处解码 x_1 、 x_2 的信干噪比 (signal-to-interference-plus noise ratio, SINR) 分别为 $\gamma_{R_1} = g(\alpha_1, k_{SR}^2, \rho_R, h_R)$ ， $\gamma_{R_2} = g(\alpha_2, \alpha_1 + k_{SR}^2, \rho_R, h_R)$ ，其中， $\rho_R = P_S / N_R$ ，表示 $S \rightarrow R$ 链路的平均信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)。

由于假定 S 采用 TAS 技术向 R 发送保密信号，即 $|h_R|^2 = \arg \max_{t=1, \dots, T} |h_{S,R}|^2$ ，因此 R 解码信号 x_1 的 SNR γ_{R_1} 的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 为：

$$F_{\gamma_{R_1}}(x) = \Pr \left(|h_R|^2 < \frac{x}{\rho_R (\alpha_1 - k_{SR}^2 x)} \right) = \Pr \left(\arg \max_{t=1, \dots, T} |h_{S,R}|^2 < \frac{x}{\rho_R (\alpha_1 - k_{SR}^2 x)} \right) \quad (2)$$

其中， $\Pr(\cdot)$ 表示求概率。

由于假定 $h_{S,R}$ ， $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 相互独立，则由文献[26]中式 (3) 并结合本文式 (2) 可推导 γ_{R_1} 的 CDF 为：

$$F_{\gamma_{R_1}}(x) = \left[1 - \sum_{i=0}^{m-1} \frac{1}{i!} \left[\frac{mx}{\rho_R (\alpha_1 - k_{SR}^2 x)} \right]^i \exp \left(- \frac{mx}{\rho_R (\alpha_1 - k_{SR}^2 x)} \right) \right]^T = 1 - \sum_{p=1}^T (-1)^{p-1} \binom{T}{p} \exp \left(- \frac{mpx}{\rho_R (\alpha_1 - k_{SR}^2 x)} \right) \left[\sum_{i=0}^{m-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{mx}{\rho_R (\alpha_1 - k_{SR}^2 x)} \right)^i \right]^p \quad (3)$$

使用 J C P Miller 多项式展开^[26], 式 (3) 可写成:

$$F_{\gamma_{R_1}}(x) = 1 - \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} G_{T,p,n} \exp\left(-\frac{mpx}{\rho_R(\alpha_1 - k_{SR}^2 x)}\right) \left[\frac{mx}{\rho_R(\alpha_1 - k_{SR}^2 x)}\right]^n \quad (4)$$

其中, $G_{T,p,n} = (TP)^T C_n(p) (-1)^{p-1} / n!$ 。

$$C_n(p) = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} [(p+1)i-n] C_{n-i}(p), n \leq m-1 \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^T \binom{n}{i} [(p+1)i-n] C_{n-i}(p), n \geq m-1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, 所有 p 符合 $C_0(p) = 1$ 。

如文献[17-18], 考虑最坏的情况, 假定 E_l 具

$$f_{\gamma_{SE}}(x) = \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} G_{L,t,q,m} \frac{m}{\rho_{E_l}(1 - xk_{SE_l}^2)^2} \left(\frac{mx}{\rho_{E_l}(1 - xk_{SE_l}^2)}\right)^{t+m-1} \exp\left(-\frac{m(q+1)x}{\rho_{E_l}(1 - xk_{SE_l}^2)}\right) \quad (6)$$

其中, $G_{L,t,q,m} = (L-1)q^T (-1)^q C_t(q) Lm / (t! \Gamma(m))$, $k_{SE_l} = \sqrt{k_S^2 + k_{E_l}^2}$ 表示 $S \rightarrow E_l$ 链路的总体硬件损伤, 由 S 的发送硬件损伤和 E_l 的接收硬件损伤两部分构成, k_S 、 k_{E_l} 分别为其 HI 影响系数。

在第二时隙, 节点 θ 受 HI 影响后的接收信号为:

$$y_{\theta}^{MF} = h_{R\theta} (\sqrt{P_R \alpha_1} x_1' + \sqrt{P_R \alpha_2} x_2' + \eta_{R,\theta}) + n_{\theta} \quad (7)$$

其中, $\theta \in \{U_1, U_2\}$, $\eta_{R,\theta}$ 服从 $CN(0, k_{R\theta}^2 P_R)$,

$k_{R,\theta} = \sqrt{k_{R_t}^2 + k_{\theta}^2}$ 表示 $R \rightarrow \theta$ 链路的总体硬件损伤, 由 R 的发送硬件损伤和 U_1 、 U_2 的接收硬件损伤构成, k_{R_t} 、 k_{θ} 分别为其 HI 影响系数。

(2) 远、近端用户的解码过程如下: U_1 将 x_1' 视为干扰信号, 先解码信号 x_2' , 然后利用 SIC 技术从接收信号中移除已经解码出的信号 x_2' , 最后再解码信号 x_1' 。 U_1 解码 x_1' 、 x_2' 的瞬时 SINR 为 $\gamma_{U_1}^1 = g(\alpha_1, k_{R,U_1}^2, \rho_{U_1}, h_{RU_1})$, $\gamma_{U_1}^2 = g(\alpha_2, \alpha_1 + k_{R,U_1}^2,$

有多用户检测能力, 即在 E_l 处可使用并行干扰消除技术来区分叠加信号, 具有最大接收 SNR 的窃听器对 MF-NOMA 系统的 PLS 危害最大, 于是有窃听 x_1 、 x_2 的 SNR 为 $\gamma_{SE_l} = \alpha_i \max_{1 \leq l \leq L} \left\{ \rho_{E_l} |h_{E_l}|^2 / \left(k_{SE_l}^2 \rho_{E_l} |h_{E_l}|^2 + 1 \right) \right\}$, 其中, $\rho_{E_l} = P_S / N_{E_l}$ 表示 $S \rightarrow E_l$ 链路的平均 SNR。

$$\text{令 } \gamma_{SE} = \max_{1 \leq l \leq L} \left\{ \rho_{E_l} |h_{E_l}|^2 / \left(k_{SE_l}^2 \rho_{E_l} |h_{E_l}|^2 + 1 \right) \right\},$$

$S \rightarrow R$ 链路的的天线选择对 E_l 来说相当于随机天线选择, 即相当于 S 为单天线发射的情况。由于假定 h_{E_l} 相互独立, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$, 根据文献[15]中式 (24) 可获得 γ_{SE} 的概率密度函数 (probability density function, PDF) 为:

ρ_{U_1}, h_{RU_1} 。 U_2 将 x_1' 视为干扰信号直接解码 x_2' 。解码 x_2' 的 SINR 为 $\gamma_{U_2}^2 = g(\alpha_2, \alpha_1 + k_{R,U_2}^2, \rho_{U_2}, h_{RU_2})$, 其中, $\rho_{U_1} = P_R / N_{U_1}$, 表示 $R \rightarrow U_1$ 链路的平均 SNR, $\rho_{U_2} = P_R / N_{U_2}$, 表示 $R \rightarrow U_2$ 链路的平均 SNR。

根据文献[26]中式 (3) 作变量代换可推导 $\gamma_{U_1}^1$ 的 CDF 为:

$$F_{\gamma_{U_1}^1}(x) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{mx}{\rho_{U_1}(\alpha_1 - k_{R,U_1}^2 x)} \right)^i \exp\left(-\frac{mx}{\rho_{U_1}(\alpha_1 - k_{R,U_1}^2 x)}\right) \quad (8)$$

其中, $k_{R,U_1} = \sqrt{k_{R_t}^2 + k_{U_1}^2}$ 表示 $R \rightarrow U_1$ 链路的总体硬件损伤, 由 R 的发送硬件损伤和 U_1 的接收硬件损伤构成, k_{R_t} 、 k_{U_1} 分别为其 HI 影响系数。

当 MF 协议修改的偏移量为 0 时, 此时 MF 协议退变为 DF 协议^[16], 此时节点 θ 受 HI 影响的接



收信号为:

$$y_{\theta}^{\text{DF}} = h_{R\theta} \left(\sqrt{P_R \alpha_1} x_1 + \sqrt{P_R \alpha_2} x_2 + \eta_{R\theta} \right) + n_{\theta} \quad (9)$$

具有最大 $R \rightarrow E_l$ 链路 SNR 的 E_l 在第二时隙对 DF-NOMA 系统的 PLS 危害最大, 于是有窃听信号 x_1 、 x_2 的 SINR $\gamma_{RE_i} = \alpha_i \max_{1 \leq l \leq L} \left\{ \rho_{E_2} |h_{RE_l}|^2 / \right.$

$$f_{\gamma_{RE}}(x) = \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} G_{L,t,q,m} \frac{m}{\rho_{E_2} (1 - x k_{R,E_l}^2)^2} \left(\frac{mx}{\rho_{E_2} (1 - x k_{R,E_l}^2)} \right)^{t+m-1} \exp \left(- \frac{m(q+1)x}{\rho_{E_2} (1 - x k_{R,E_l}^2)} \right) \quad (10)$$

其中, $k_{R,E_l} = \sqrt{k_{R_l}^2 + k_{E_l}^2}$ 表示 $R \rightarrow E_l$ 链路的总体硬件损伤, 由 R 的发送硬件损伤和 E_l 的接收硬件损伤两部分构成, k_{R_l} 、 k_{E_l} 分别为其 HI 影响系数。

在图 1 的 MF-NOMA 系统中, U_1 的信道容量受限于 $S \rightarrow R$ 、 $R \rightarrow U_1$ 链路中的最小 SINR, 所以 U_1 的信道容量为:

$$C_{U_1} = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \min \{ \gamma_{R_1}, \gamma_{U_1}^1 \} \right) \quad (11)$$

其中, γ_{R_1} 为 R 解码信号 x_1 在第一时隙的 SNR, $\gamma_{U_1}^1$ 为 U_1 解码信号 x_1 在第二时隙的 SNR。

U_2 的信道容量受限于 $S \rightarrow R$ 、 $R \rightarrow U_2$ 和 $R \rightarrow U_1$ 链路中的最小 SINR, 于是有 U_2 的信道容量为:

$$C_{U_2} = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \min \{ \gamma_{R_2}, \gamma_{U_1}^2, \gamma_{U_2}^2 \} \right) \quad (12)$$

其中, γ_{R_2} 为 R 解码信号 x_2 在第一时隙的 SNR, $\gamma_{U_1}^2$ 为 U_1 解码信号 x_2 在第二时隙的 SNR, $\gamma_{U_2}^2$ 为 U_2 解码信号 x_2 在第二时隙的 SNR。

对于 MF 协议窃听链路的信道容量由 $S \rightarrow E_l$ 链路决定, 即:

$$C_{E_i}^{\text{MF}} = \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \gamma_{SE_i}) \quad (13)$$

其中, γ_{SE_i} 为 E_l 解码信号 x_1 或 x_2 在第一时隙的 SNR, $i \in \{1, 2\}$ 。

假定窃听者在两个时隙采用选择合并实施被动窃听, 则对于 DF 协议, 窃听信道的容量取决于 $S \rightarrow E_l$ 和 $R \rightarrow E_l$ 链路中最大的 SINR, 即:

$\left(k_{R,E_l}^2 \rho_{E_2} |h_{RE_l}|^2 + 1 \right)$ 其中, $\rho_{E_2} = P_R / N_E$ 表示 $R \rightarrow E_l$ 链路的平均 SNR。

令 $\gamma_{RE} = \max_{1 \leq l \leq L} \left\{ \rho_{E_2} |h_{RE_l}|^2 / \left(k_{R,E_l}^2 \rho_{E_2} |h_{RE_l}|^2 + 1 \right) \right\}$, 同上述 γ_{SE} 的 PDF, γ_{RE} 的 PDF 可以表示为:

$$C_{E_i}^{\text{DF}} = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \max \{ \gamma_{SE_i}, \gamma_{RE_i} \} \right) \quad (14)$$

其中, γ_{SE_i} 为 E_l 解码信号 x_1 或 x_2 在第一时隙的 SNR, γ_{RE_i} 为 E_l 解码信号 x_1 或 x_2 在第二时隙的 SNR。

于是可得 MF/DF-NOMA 系统中 U_i 的安全容量为:

$$C_i^Z = [C_{U_i} - C_{E_i}^Z]^+ \quad (15)$$

其中, $Z \in \{\text{MF}, \text{DF}\}$, $[x]^+ = \max \{0, x\}$ 。

3 安全性能分析

下面将推导图 1 所示的 MF-NOMA 系统的安全中断概率、渐近安全中断概率和严格正安全容量的近似表达式, 详细分析基站天线数 T 、窃听节点数 L 、各链路平均信噪比、硬件损伤系数等对这些性能指标的影响。另外, 给出了 DF-NOMA 系统的 PLS 性能指标表达式, 从而与 MF-NOMA 系统作对比。

3.1 安全中断概率

3.1.1 MF-NOMA 系统

MF-NOMA 系统的 SOP 可以定义为 U_1 和 U_2 中至少有一个用户的安全容量 C_i^{MF} 小于其目标安全速率 R_i 的概率^[17], $i \in \{1, 2\}$, 根据式 (11) ~ 式 (13) 和式 (15) 可得:

$$\begin{aligned} \text{SOP}^{\text{MF}} &= \Pr \left(C_1^{\text{MF}} < R_1 \text{ 或 } C_2^{\text{MF}} < R_2 \right) = \\ &= 1 - \Pr \left(C_{U_1} - C_E^{\text{MF}} \geq R_1 \right) \Pr \left(C_{U_2} - C_E^{\text{MF}} \geq R_2 \right) = \\ &= 1 - \Pr \left(\frac{1 + \gamma_1}{1 + \gamma_{SE_1}} \geq \beta_1 \right) \Pr \left(\frac{1 + \gamma_2}{1 + \gamma_{SE_2}} \geq \beta_2 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\gamma_1 = \min(\gamma_{R_1}, \gamma_{U_1}^1)$, $\gamma_2 = \min(\gamma_{R_2}, \gamma_{U_1}^2, \gamma_{U_2}^2)$, $\beta_1 = 2^{2R_1}$, $\beta_2 = 2^{2R_2}$.

由于式 (16) 中 γ_i 与 γ_{SE_i} 之间存在相关性, 从而难以获得 SOP 的精确表达式。本文主要聚焦于高 SNR 下的分析, 采用与文献[20]相同的假设, 假定 U_1 和 U_2 的接收损伤因子相等, $k_{U_1} = k_{U_2} = k_U$, 于是可得 $\gamma_2 \approx \min(\alpha_2 / (\alpha_1 + k_{SR}^2), \alpha_2 / (\alpha_1 + k_{R,U}^2))$, 其中, k_{SR}^2 和 $k_{R,U}^2$ 分别表示 $S \rightarrow R$ 链路和 $R \rightarrow U_2$ 链路的总体硬件损伤。

将 γ_2 、 $\gamma_{SE_1} = \alpha_1 \gamma_{SE}$ 和 $\gamma_{SE_2} = \alpha_2 \gamma_{SE}$ 同时代入式 (16) 并整理可得:

$$\text{SOP}^{\text{MF}} = 1 - \Pr\left(\frac{1 + \gamma_1}{1 + \alpha_1 \gamma_{SE}} \geq \beta_1\right) \Pr\left(\frac{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + c^2}}{1 + \alpha_2 \gamma_{SE}} \geq \beta_2\right) = 1 - \Pr(\gamma_1 \geq B\gamma_{SE} + z_1) \Pr(\gamma_{SE} \leq \tau_c) \quad (17)$$

其中, $z_1 = \beta_1 - 1$, $\tau_c = (1 - \beta_2 + \alpha_2 / (\alpha_1 + c^2)) / (\beta_2 \alpha_2)$, $B = \beta_1 \alpha_1$ 。当 $k_{SR} \geq k_{R,U}$ 时, $c^2 = k_{SR}^2$; 当 $k_{SR} < k_{R,U}$ 时, $c^2 = k_{R,U}^2$ 。 $k_{SR} = \sqrt{k_S^2 + k_R^2}$ 表示 $S \rightarrow R$ 链路的总体硬件损伤, 由 S 的发送硬件损伤和 R 的接

$$F_{\gamma_1}(x) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} \exp\left(-\frac{mpx}{\rho_R(\alpha_1 - k_{SR}^2 x)} - \frac{mx}{\rho_{U_1}(\alpha_1 - k_{R,U}^2 x)}\right) \left[\frac{mx}{\rho_R(\alpha_1 - k_{SR}^2 x)}\right]^n \left(\frac{mx}{\rho_{U_1}(\alpha_1 - k_{R,U}^2 x)}\right)^i \quad (21)$$

将式 (21) 和式 (6) 代入式 (18) 可得 I_{SE} 的表达式为:

$$I_{SE} = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} \int_0^{\tau_c} \frac{m}{\rho_{E_1}(1 - xk_{SE_i}^2)} \left(\frac{mx}{\rho_{E_1}(1 - xk_{SE_i}^2)}\right)^{t+m-1} \left(\frac{m(Bx+z_1)}{\rho_R(\alpha_1 - k_{SR}^2(Bx+z_1))}\right)^n \left(\frac{m(Bx+z_1)}{\rho_{U_1}(\alpha_1 - k_{R,U}^2(Bx+z_1))}\right)^i \exp\left(-\frac{m(q+1)x}{\rho_{E_1}(1 - xk_{SE_i}^2)} - \frac{mp(Bx+z_1)}{\rho_R(\alpha_1 - k_{SR}^2(Bx+z_1))} - \frac{m(Bx+z_1)}{\rho_{U_1}(\alpha_1 - k_{R,U}^2(Bx+z_1))}\right) dx \quad (22)$$

由于式 (22) 的闭合式难以求解, 定义如下函数。

收硬件损伤构成, k_S 、 k_R 分别为其 HI 影响系数。 $k_{R,U} = \sqrt{k_{R_i}^2 + k_U^2}$ 表示 $R \rightarrow U_2$ 链路的总体硬件损伤, 由 R 的发送硬件损伤和 U_2 的接收硬件损伤构成, k_{R_i} 、 k_U 分别为其 HI 影响系数。

为了后文方便表示, 定义如下函数。

$$I_a = \Pr(\gamma_1 \geq B\gamma_a + z_1) \Pr(\gamma_a \leq \tau_c) = \int_0^{\tau_c} (1 - F_{\gamma_1}(Bx + z_1)) f_{\gamma_a}(x) dx \quad (18)$$

其中, $a \in \{SE, RE\}$, 分别表示 $S \rightarrow E_i$ 链路和 $R \rightarrow E_i$ 链路。

将式 (18) 代入式 (16) 并整理可得:

$$\text{SOP}^{\text{MF}} = \begin{cases} 1 - I_{SE}, & \alpha_2 > (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \\ 1, & \alpha_2 < (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \end{cases} \quad (19)$$

由式 (19) 可知, 求 SOP^{MF} 即求 I_{SE} , 将 $f_{\gamma_{SE}}(x)$ 和 $F_{\gamma_1}(x)$ 代入其中进行积分运算即可。 $f_{\gamma_{SE}}(x)$ 的解析式已由式 (6) 给出, 由于 γ_{R_1} 、 $\gamma_{U_1}^1$ 相互独立, 则 $\gamma_1 = \min(\gamma_{R_1}, \gamma_{U_1}^1)$ 的 CDF 为:

$$F_{\gamma_1}(x) = \Pr(\gamma_1 < x) = 1 - [1 - F_{\gamma_{R_1}}(x)] [1 - F_{\gamma_{U_1}^1}(x)] \quad (20)$$

将式 (4) 和式 (8) 代入式 (20), 可得:



$$f_{S_{v_u}}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u) = \int_0^{\tau_c} \prod_{u=1}^3 \left(\frac{mx_u}{\rho_u(b_u - k_u^2 x)} \right)^{A_u} \left(\frac{m}{\rho_u(b_u - k_u^2 x)^2} \right)^{C_u} \exp\left(-\frac{d_u mx}{\rho_u(b_u - k_u^2 x)}\right) dx \quad (23)$$

利用文献[18]中的高斯-切比雪夫正交定理可得近似式为:

$$f_{S_{v_u}}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u) \approx \frac{\tau_c}{2} \frac{\pi}{V} \sum_{v=1}^V \theta_v \prod_{u=1}^3 \left(\frac{mS_{v_u}}{\rho_u(b_u - k_u^2 S_{v_u})} \right)^{A_u} \left(\frac{m}{\rho_u(b_u - k_u^2 S_{v_u})^2} \right)^{C_u} \exp\left(-\frac{d_u m S_{v_u}}{\rho_u(b_u - k_u^2 S_{v_u})}\right) \quad (24)$$

其中, $\varphi_v = \cos((2v-1)\pi/(2V))$, $s_v = \tau_c(1 + \varphi_v)/2$,

$$\theta_v = \sqrt{1 - \varphi_v^2}.$$

利用式(24)和式(22)可得 I_{SE} 为:

$$I_{SE} = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_{v_u}}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u) \quad (25)$$

其中, $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\} = \{\rho_R, \rho_{E_1}, \rho_{U_1}\}$, ρ_R 为S→R链路的平均SNR, ρ_{E_1} 为S→ E_1 链路的平均SNR, ρ_{U_1} 为:

$$SOP^{MF} = \begin{cases} 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_{v_u}}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u), & \alpha_2 > (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \\ 1, & \alpha_2 < (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \end{cases} \quad (26)$$

对于基站单个发射天线, 单个窃听者且收发设备硬件均为理想设计的MF-NOMA系统PLS模型, 在 $m=1$, 即瑞利衰落信道场景的SOP可由式(26)简化为:

$$SOP^{MF} = 1 - \frac{\rho_R \rho_{U_1} \alpha_1}{\rho_R \rho_{U_1} \alpha_1 + \beta_1 \alpha_1 (\rho_R + \rho_{U_1})} \exp\left(-\frac{z_1 (\rho_R + \rho_{U_1})}{\rho_R \rho_{U_1} \alpha_1}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\rho_R \rho_{U_1} \alpha_1 + \beta_1 \alpha_1 (\rho_R + \rho_{U_1})}{\rho_R \rho_{U_1} \alpha_1 \rho_E} \tau\right) \right] \quad (27)$$

其中, $\tau = (1 - \beta_2 + \alpha_2/\alpha_1)/(\beta_2 \alpha_2)$ 。当S→R链路的平均SNR ρ_R 与R→ U_1 链路的平均SNR ρ_{U_1} 相等时, 式(27)与文献[17]中式(10)结果一致。可见, 本文的结果更具一般性。

R→ U_1 链路的平均SNR。 $\{b_1, b_2, b_3\} = \{\alpha_1, 1, \alpha_1\}$, α_1 为信号 x_1 的功率分配因子。 $\{k_1^2, k_2^2, k_3^2\} = \{k_{SR}^2, k_{SE_1}^2, k_{R,U}^2\}$, k_{SR}^2 表示S→R链路的总体硬件损伤, $k_{SE_1}^2$ 表示S→ E_1 链路的总体硬件损伤, $k_{R,U}^2$ 表示R→ U_1 链路的总体硬件损伤, $\{d_1, d_2, d_3\} = \{p, q+1, 1\}$, $\{C_1, C_2, C_3\} = \{0, 1, 0\}$, $\{A_1, A_2, A_3\} = \{n, t+m-1, i\}$, $\{S_{v_1}, S_{v_2}, S_{v_3}\} = \{BS_v + z_1, S_v, BS_v + z_1\}$ 。

最终, 将式(25)代入式(19)可得MF-NOMA系统的SOP为:

定理1 在非合谋窃听场景中, MF-NOMA系统的SOP受多个关键参数的影响, 它们是基站天线数 T , 窃听节点数 L , 信道衰落系数 m , S→R链路平均信噪比 ρ_R , R→ U_1 链路平均信噪比 ρ_{U_1} , S→ E_1 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_1} , S发送信号硬件损伤因子 k_S , R、 E_1 、 U_1 接收信号硬件损伤因子 k_R 、 k_{E_1} 、 k_U 和 U_1 、 U_2 的目标安全速率 R_1 、 R_2 等。

3.1.2 DF-NOMA系统

DF-NOMA系统的SOP可以定义为 U_1 和 U_2 中至少有一个用户的安全容量 C_i^{DF} 小于其目标安全速率 R_i 的概率, $i \in \{1, 2\}$, 根据式(11)~式(15)和式(16), DF-NOMA系统的SOP可以表示为:

$$\text{SOP}^{\text{DF}} = 1 - \Pr\left(\frac{1 + \gamma_1}{1 + \alpha_1 \max\{\gamma_{\text{SE}}, \gamma_{\text{RE}}\}} \geq \beta_1\right) \\ \Pr\left(\frac{1 + \gamma_2}{1 + \alpha_2 \max\{\gamma_{\text{SE}}, \gamma_{\text{RE}}\}} \geq \beta_2\right) \quad (28)$$

式 (28) 结合式 (18) 可得 SOP^{DF} 为:

$$\text{SOP}^{\text{DF}} = \begin{cases} 1 - I_{\text{SE}} \times I_{\text{RE}}, & \alpha_2 > (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \\ 1, & \alpha_2 < (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \end{cases} \quad (29)$$

观察式 (28), 由于 I_{SE} 已由式 (25) 给出, 只需得到 I_{RE} 即可求得 SOP^{DF} 表达式。将式 (10) 和式 (21) 分别代入式 (18) 进行积分运算, 并结合式 (24) 可得 I_{RE} 为:

$$\text{SOP}^{\text{DF}} = \begin{cases} 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_{v_u}}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u) \times \\ \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_{v_u}}(\xi_u, b_u, \xi_u^2, d_u, A_u, C_u), & \alpha_2 > (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \\ 1, & \alpha_2 < (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \end{cases} \quad (31)$$

定理 2 在非合谋窃听场景中, DF-NOMA 系统的 SOP 受多个关键参数的影响, 包括基站天线数 T , 窃听节点数 L , 信道衰落系数 m , $\text{S} \rightarrow \text{R}$ 链路平均信噪比 ρ_{R} , $\text{R} \rightarrow \text{U}_i$ 链路平均信噪比 ρ_{U_i} , $\text{S} \rightarrow \text{E}_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_l} , $\text{R} \rightarrow \text{E}_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_2} , S 、 R 发送信号硬件损伤因子 k_{S} 、 k_{R_l} , R 、 E_l 、 U_1 接收信号硬件损伤因子 k_{R} 、 k_{E_l} 、 k_{U} 和 U_1 、 U_2 的目标安全速率 R_1 、 R_2 等。

$$\text{SOP}_{\infty}^{\text{MF}} = \begin{cases} 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{t=0}^{L-1} \sum_{q=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{L,t,q,m} f_{S_{v_2}}(\rho_2, b_2, k_2^2, d_2, A_2, C_2), & \alpha_2 > (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \\ 1, & \alpha_2 < (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \end{cases} \quad (32)$$

其中, $\{\rho_2, b_2, k_2^2, d_2, A_2, C_2\} = \{\rho_{\text{E}_1}, 1, k_{\text{SE}_l}^2, 1, q+1, t+m-1\}$, ρ_{E_1} 为 $\text{S} \rightarrow \text{E}_l$ 链路的平均 SNR, $k_{\text{SE}_l}^2$ 表示 $\text{S} \rightarrow \text{E}_l$ 链路的总体硬件损伤。

对于基站单个发射天线, 单个窃听者且收发设备硬件均为理想设计的 MF-NOMA 系统 PLS 模

$$I_{\text{RE}} = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} \\ f_{S_{v_u}}(\xi_u, b_u, \xi_u^2, d_u, A_u, C_u) \quad (30)$$

其中, b_u 、 d_u 、 A_u 、 C_u 、 S_{v_u} 的值对应式 (24), $\{\xi_1, \xi_2, \xi_3\} = \{\rho_{\text{R}}, \rho_{\text{E}_2}, \rho_{\text{U}_1}\}$, $\{\xi_1^2, \xi_2^2, \xi_3^2\} = \{k_{\text{SR}}^2, k_{\text{R}_l \text{E}_l}^2, k_{\text{R}_l \text{U}_1}^2\}$, k_{SR}^2 表示 $\text{S} \rightarrow \text{R}$ 链路的总体硬件损伤, $k_{\text{R}_l \text{E}_l}^2$ 表示 $\text{R} \rightarrow \text{E}_l$ 链路的总体硬件损伤, $k_{\text{R}_l \text{U}_1}^2$ 表示 $\text{R} \rightarrow \text{U}$ 链路的总体硬件损伤。

将式 (30) 和式 (25) 代入式 (29) 可得 DF-NOMA 系统的 SOP 为:

3.2 渐近安全中断概率

3.2.1 MF-NOMA 系统

为了更好地理解高 SNR 下 MF-NOMA 系统的 PLS 性能, 接下来研究当 $\rho_{\text{R}} \rightarrow \infty$, $\rho_{\text{U}_i} \rightarrow \infty$ 时 MF-NOMA 系统的渐近 SOP, 具体表达式如下。

当 $\rho_{\text{R}} \rightarrow \infty$, $\rho_{\text{U}_i} \rightarrow \infty$ 时, $\gamma_1 \rightarrow \infty$, MF-NOMA 系统的渐近 SOP 由 U_2 决定。参考文献 [15] 中的式 (33), 再结合本文式 (26) 可得 MF-NOMA 系统的渐近 SOP 的表达式为:

型, 在 $m=1$, 即瑞利衰落信道场景的渐近 SOP 可由式 (32) 退化为:

$$\text{SOP}_{\infty}^{\text{MF}} = \exp\left(-\frac{(1 - \beta_2 + \alpha_2/\alpha_1)/(\beta_2 \alpha_2)}{\rho_{\text{E}}}\right) \quad (33)$$

与文献 [17] 中的式 (11) 结果一致, 可见,



本文的结果更具一般性。

定理3 在非合谋窃听场景中, MF-NOMA系统的渐近SOP与信道衰落系数 m , 窃听节点数 L , $S \rightarrow E_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_l} , S 发送信号硬件损伤因子 k_S , R 、 E_l 、 U_1 接收信号硬件损伤因子 k_R 、 k_{E_l} 、 k_U 和 U_2 的目标安全速率 R_2 等因素

$$\text{SOP}_\infty^{\text{DF}} = \begin{cases} 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{l=0}^{q(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \frac{1}{i!} G_{L,t,q,m} f_{S_{v_2}}(\rho_2, b_2, k_2^2, d_2, A_2, C_2) \times \\ \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{l=0}^{q(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \frac{1}{i!} G_{L,t,q,m} f_{S_{v_2}}(\xi_2, b_2, \xi_2^2, d_2, A_2, C_2), \alpha_2 > (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \\ 1, \alpha_2 < (\beta_2 - 1)(\alpha_1 + c^2) \end{cases} \quad (34)$$

定理4 在非合谋窃听场景中, DF-NOMA系统的渐近SOP与信道衰落系数 m , 窃听节点数 L , $S \rightarrow E_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_l} , $R \rightarrow E_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_2} , S 、 R 发送信号硬件损伤因子 k_S 、 k_R , R 、 E_l 、 U_1 接收信号硬件损伤因子 k_R 、 k_{E_l} 、 k_U 和 U_2 的目标安全速率 R_2 等因素有关。

3.3 严格正安全容量

3.3.1 MF-NOMA系统

MF-NOMA系统的严格正安全容量 (SPSC) 可定义为系统中用户 U_1 、 U_2 的安全容量均大于零的概率, 结合式(11)~式(15), 该系统的SPSC为^[17]:

$$\text{SPSC}^{\text{MF}} = \Pr(C_1^{\text{MF}} > 0, C_2^{\text{MF}} > 0) = \Pr(\gamma_1 > \alpha_1 \gamma_{\text{SE}}, \gamma_{\text{SE}} < a_c) \quad (35)$$

其中, $a_c = 1/(\alpha_1 + c^2)$, $c^2 \in \{k_{\text{SR}}^2, k_{\text{R,U}}^2\}$ 。当 $k_{\text{SR}} \geq k_{\text{R,U}}$ 时, $c^2 = k_{\text{SR}}^2$; 当 $k_{\text{SR}} < k_{\text{R,U}}$ 时, $c^2 = k_{\text{R,U}}^2$ 。

$$\text{SPSC}^{\text{MF}} = \begin{cases} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_\eta}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u), \alpha_1 < 1 - c^2 \\ 0, \alpha_1 > 1 - c^2 \end{cases} \quad (39)$$

对于基站单个发射天线, 单个窃听者且收发设备硬件均为理想设计的MF-NOMA系统PLS模

型, 当 $m=1$ 时, 即瑞利衰落信道场景的SPSC可由式(39)退化为:

3.2.2 DF-NOMA系统

当 $\rho_R \rightarrow \infty$, $\rho_{U_i} \rightarrow \infty$ 时, $\gamma_1 \rightarrow \infty$, DF-NOMA系统的渐近SOP由 U_2 决定。根据式(11)~式(15)和式(28), 并参考式(31)可得DF-NOMA系统的渐近SOP为:

为方便后文表示, 定义如下函数。

$$\Omega_a = \Pr(\gamma_1 \geq \alpha_1 \gamma_a) \Pr(\gamma_a \leq \tau_c) = \int_0^{a_c} (1 - F_{\gamma_1}(\alpha_1 \gamma_a)) f_{\gamma_a}(x) dx \quad (36)$$

其中, $a \in \{\text{SE}, \text{RE}\}$, 分别表示 $S \rightarrow E_l$ 链路和 $R \rightarrow E_l$ 链路。

式(35)结合式(36)可得:

$$\text{SPSC}^{\text{MF}} = \begin{cases} \Omega_{\text{SE}}, \alpha_1 < 1 - c^2 \\ 0, \alpha_1 > 1 - c^2 \end{cases} \quad (37)$$

接下来将式(6)和式(21)代入式(36)进行积分, 并结合式(24)可得 Ω_{SE} 为:

$$\Omega_{\text{SE}} = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_\eta}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u) \quad (38)$$

其中, $\eta \in \{1, 2, 3\}$, $\{S_1, S_2, S_3\} = \{\alpha_1 S_v, S_v, \alpha_1 S_v\}$ 。

最后, 将式(38)代入式(37)可得MF-NOMA系统的SPSC为:

$$\text{SPSC} = \frac{\rho_R \rho_{U_1}}{\rho_R \rho_{U_1} + \rho_E \rho_{U_1} + \rho_R \rho_E} \left[1 - \exp\left(-\frac{\rho_R \rho_{U_1} + \rho_E \rho_{U_1} + \rho_R \rho_E}{\alpha_1 \rho_E \rho_R \rho_{U_1}}\right) \right] \quad (40)$$

当 $S \rightarrow R$ 链路的平均 SNR ρ_R 与 $R \rightarrow U_1$ 链路的平均 SNR ρ_{U_1} 相等时, 与文献[17]中的式 (16) 结果一致, 可见, 本文的结果更具一般性。

定理 5 非合谋窃听场景中, MF-NOMA 系统的 SPSC 受多个关键参数的影响, 包括信道衰落系数 m , 基站天线数 T , 窃听节点数 L , $S \rightarrow R$ 链路平均信噪比 ρ_R , $R \rightarrow U_i$ 链路平均信噪比 ρ_{U_i} , $S \rightarrow E_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_l} , S 发送信号硬件损伤因子 k_S , R 、 E_l 、 U_1 接收信号硬件损伤因子 k_R 、 k_{E_l} 、 k_U 等。

3.3.2 DF-NOMA 系统

DF-NOMA 系统的 SPSC 可定义为系统中用户 U_1 、 U_2 的安全容量均大于零的概率, 根据

$$\text{SPSC}^{\text{DF}} = \begin{cases} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_{\eta}}(\rho_u, b_u, k_u^2, d_u, A_u, C_u) \times \\ \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_{\eta}}(\xi_u, b_u, \xi_u^2, d_u, A_u, C_u), \alpha_1 < 1 - c^2 \\ 0, \alpha_1 > 1 - c^2 \end{cases} \quad (44)$$

定理 6 非合谋窃听场景中, DF-NOMA 系统的 SPSC 受多个关键参数的影响, 包括信道衰落系数 m , 基站天线数 T , 窃听节点数 L , $S \rightarrow R$ 链路平均信噪比 ρ_R , $R \rightarrow U_i$ 链路平均信噪比 ρ_{U_i} , $S \rightarrow E_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_l} , $R \rightarrow E_l$ 窃听链路平均信噪比 ρ_{E_2} , S 、 R 发送信号硬件损伤因子 k_S 、 k_R , R 、 E_l 、 U_1 接收信号硬件损伤因子 k_R 、 k_{E_l} 、 k_U 等。

4 数值计算与仿真

下面使用计算机仿真软件对 MF/DF-NOMA 系统的 SOP、渐近 SOP 和 SPSC 数值进行计算和仿真, 研究了 m 、 T 、 L 、 $S \rightarrow R$ 链路平均信噪比

式 (11) ~ 式 (15) 和式 (35) 可得 DF-NOMA 系统的 SPSC 表示为:

$$\text{SPSC}^{\text{DF}} = \Pr(C_1^{\text{DF}} > 0, C_2^{\text{DF}} > 0) = \Pr(\gamma_1 > \alpha_1 \max\{\gamma_{SE}, \gamma_{RE}\}, \max\{\gamma_{SE}, \gamma_{RE}\} < a_c) \quad (41)$$

式 (41) 结合式 (36) 可得:

$$\text{SPSC}^{\text{DF}} = \begin{cases} \Omega_{SE} \times \Omega_{RE}, \alpha_1 < 1 - c^2 \\ 0, \alpha_1 > 1 - c^2 \end{cases} \quad (42)$$

式 (38) 已知 Ω_{SE} 的表达式, 只需求得 Ω_{RE} 的表达式即可得到 SPSC^{DF} 。将式 (10) 和式 (21) 代入式 (36) 并积分, 再结合式 (24) 可得 Ω_{RE} 为:

$$\Omega_{RE} = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{p=1}^T \sum_{n=0}^{p(m-1)} \sum_{q=0}^{L-1} \sum_{t=0}^{q(m-1)} \frac{1}{i!} G_{T,p,n} G_{L,t,q,m} f_{S_{\eta}}(\xi_u, b_u, \xi_u^2, d_u, A_u, C_u) \quad (43)$$

最终, 将式 (43) 和式 (38) 代入式 (42) 可得 DF-NOMA 系统的 SPSC 为:

ρ_R 、 $R \rightarrow U_i$ 链路平均信噪比 ρ_{U_i} 、 ρ_E 和 k_S 、 k_R 、 k_{E_l} 、 k_U 等参数的变化对 MF/DF-NOMA 系统的影响。 T 、 L 、 ρ_E 等参数的设置参考文献[17-18], 硬件损伤参数 k 的设置参考文献[19-20]。例如, 令 $k_S = k_R = k_{E_l} = k_U = k$, 发射功率 $P_S = P_R$, 噪声功率 $N_l = 1$, 则 $\rho = \rho_R = \rho_{U_i}$, 除非特别声明, MF/DF-NOMA 系统的仿真参数见表 1。

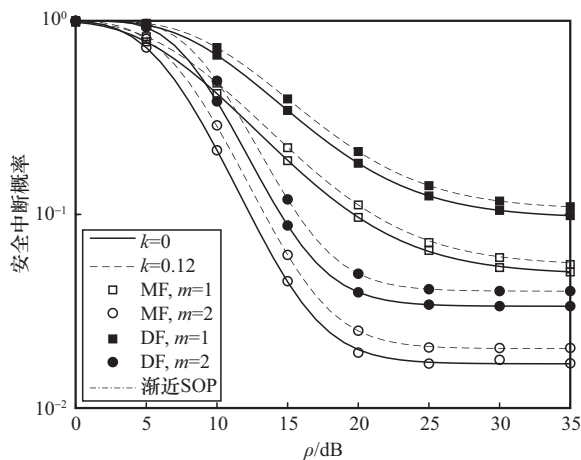
不同 m 、 k 时 MF/DF-NOMA 系统的 SOP 性能曲线如图 2 所示。

(1) 随着 ρ 值的增大, MF/DF-NOMA 系统的 SOP 下降, 这是由于 ρ 增大使 C_i 增大, 从而导致 SOP 减小。



表1 MF/DF-NOMA系统的仿真参数

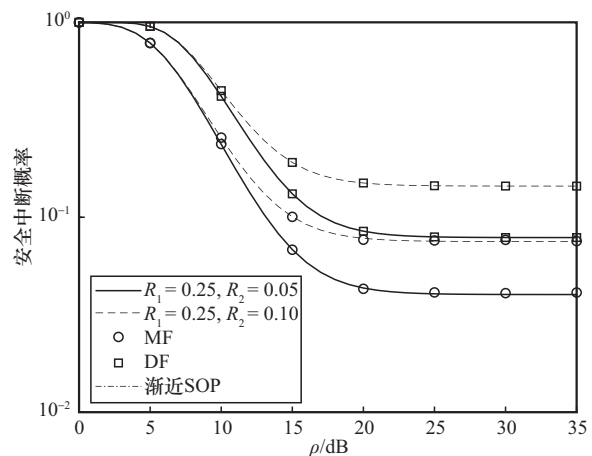
参数名称	符号表示	参数值	参数说明
功率分割因子	α_1, α_2	0.3, 0.7	图2~图7
信道衰落系数	m	2	图3~图7
发射天线数	T	1, 3	图2, 图3, 图5~图7
窃听节点数	L	1, 2	图2, 图3, 图5~图7
硬件损伤因子	k	0.12	图3~图4, 图6~图7
窃听链路平均信噪比/dB	ρ_{E_1}, ρ_{E_2}	0	图2~图6
目标安全速率/(bit·s·Hz ⁻¹)	R_1, R_2	0.25, 0.10	图2, 图4~图6
高斯-切比雪夫项数	V	100	图2~图7

图2 不同 m 、 k 值时MF/DF-NOMA系统的SOP性能曲线

(2) MF/DF-NOMA系统的SOP随着 m 的增大而减小。例如,当 $k=0$ 、 $\rho=20$ dB时, m 从1增加到2, MF-NOMA系统的SOP从0.096 6减小到0.020 0, DF-NOMA系统的SOP从0.183 8减小到0.039 6。这是因为 m 越大,信道衰落越小, C_{U_i} 和 C_E 都增大,但 C_{U_i} 的增幅大,所以安全容量仍在增大,即MF/DF-NOMA系统的SOP减小。在相同条件下, MF-NOMA系统的SOP始终低于DF-NOMA系统,即MF-NOMA系统的PLS性能优于DF-NOMA系统。

(3) 收发设备的HIs会恶化MF/DF-NOMA系统的PLS性能。例如,当 $m=2$ 、 $\rho=20$ dB、 $k=0.12$ 时,相较于收发设备理想情况下, MF-NOMA系统的SOP从0.020 0增大到2.025 0, DF-NOMA系统的SOP从0.039 6增大到0.049 4。

不同 R_2 时MF/DF-NOMA系统的SOP性能曲线如图3所示。 R_2 越大, MF/DF-NOMA系统的PLS性能越差。例如,当 $\rho=20$ dB时, R_2 从0.05增大到0.10, MF-NOMA系统的SOP从0.043 4增大到0.078 0, DF-NOMA系统的SOP从0.084 8增大到0.149 9。这是因为 R_2 增大,使 U_2 的安全容量超过其目标安全速率 R_2 的概率减小, U_2 的SOP增大, MF/DF-NOMA系统的SOP也随之增大。在相同条件下, MF-NOMA系统的SOP始终低于DF-NOMA系统,即MF-NOMA系统的PLS性能优于DF-NOMA系统的PLS性能。

图3 不同 R_2 时MF/DF-NOMA系统的SOP性能曲线

不同 T 、 L 值时MF/DF-NOMA系统的SOP性能曲线如图4所示。基站发射天线数越多和窃听节点数越少, MF/DF-NOMA系统的PLS性能越好。例如,当 $k=0.12$ 、 $\rho=15$ dB、 $L=1$ 时, T 从1增加

到 3, MF-NOMA 系统的 SOP 从 0.077 1 降低到 0.058 0, DF-NOMA 系统的 SOP 从 0.148 3 降低到 0.112 7。这是因为 T 增大后, 通过 TAS 技术使 R 的接收 SINR 增大, 当 $\gamma_{R_i} < \gamma_{U_i}^i$, C_{U_i} 变大, 而 C_E 不变, 因此, MF/DF-NOMA 系统的 C_i 增大, SOP 减小。当 $\gamma_{R_i} > \gamma_{U_i}^i$, C_{U_i} 不变, C_E 也不变, 因此, MF/DF-NOMA 系统的 C_i 不变, SOP 不变。当 $k=0.12$ 、 $\rho=15$ dB、 $T=3$ 时, L 从 1 增加到 2 时, MF-NOMA 系统的 SOP 从 0.058 0 提高到 0.100 6, DF-NOMA 系统的 SOP 从 0.112 7 提高到 0.191 1。这是因为随着 L 数量的增加, 窃听到保密信号的概率提高, 从而增大了 C_E , 导致 MF/DF-NOMA 系统的 C_i 减小。在相同条件下, MF-NOMA 系统的 SOP 始终低于 DF-NOMA 系统, 即 MF-NOMA 系统的 PLS 性能优于 DF-NOMA 系统。

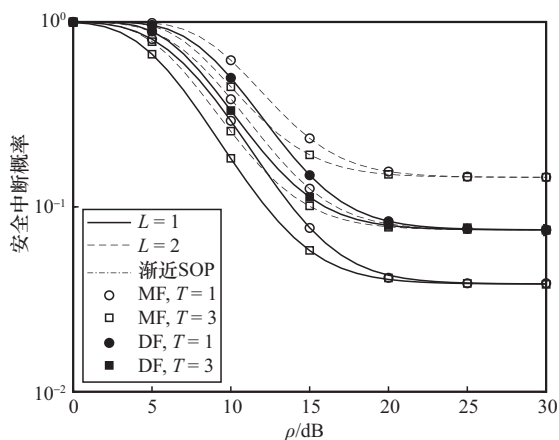


图4 不同 T, L 值时 MF/DF-NOMA 系统的 SOP 性能曲线

不同 k 值时 MF-NOMA 系统的 SOP 性能曲线如图 5 所示。设定 $k=0, 0.12, 0.20, 0.30$ 。 k 增大, MF-NOMA 系统的 SOP 增大; 当 k 小于 0.12 时, 对 MF-NOMA 系统的 PLS 性能影响较小, 当 k 大于 0.2 时, 对 MF-NOMA 系统的 PLS 性能影响较大。例如, 当 $\rho=20$ dB, k 从 0 增加到 0.12 时, MF-NOMA 系统的 SOP 从 0.035 6 提高到 0.038 1; k 从 0 增加到 0.30 时, MF-NOMA 系统的 SOP 从 0.035 6 提高到 0.058 2。

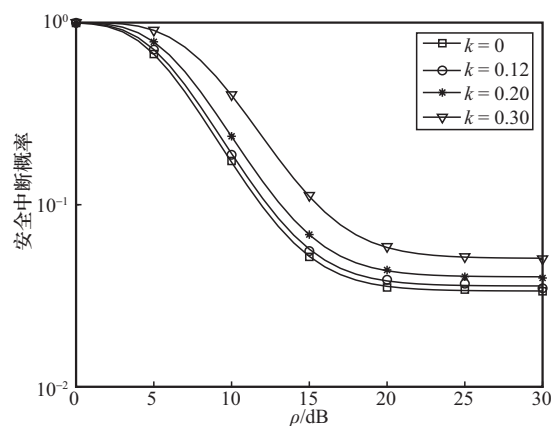


图5 不同 k 值时 MF-NOMA 系统的 SOP 性能曲线

HI 在不同节点时 MF-NOMA 系统的 SOP 性能曲线如图 6 所示。从图 6 可知, HI 对该系统 SOP 的影响程度因所在节点而异。当 HI 仅出现在基站或接收用户 U_1 节点时, 对系统 SOP 的影响较小; 而在中继节点、接收用户 U_2 节点或窃听节点时, 对系统 SOP 的影响较大。例如, 在 MF-NOMA 系统中, 在 SOP 处于 0.050 0 这一特定条件下, 相较于理想硬件的情况, 当 HI 仅出现在窃听节点时, MF-NOMA 系统的 PLS 性能呈现约 3 dB 的增益效果; 反之, 若 HI 仅存在于接收用户 U_2 节点或中继节点时, MF-NOMA 系统的 PLS 性能则会产生约 2 dB 的下降。另外, 鉴于联合 HI 不仅干扰合法接收用户、但又削弱窃听用户能力, 所以对 MF-NOMA 系统整体 PLS 性能的影响, 比 HI 仅存于接收用户 U_2 节点或中继节点时略小。

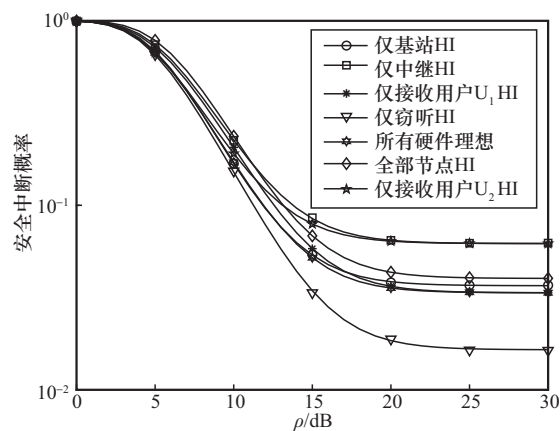


图6 HI 在不同节点时 MF-NOMA 系统的 SOP 性能曲线



不同 ρ_E 时MF/DF-NOMA系统的SPSC性能曲线如图7所示。当 $\rho=5$ dB时, ρ_E 从0 dB增加到5 dB时, MF-NOMA系统的严格正安全容量概率从0.611 0降低到0.218 6, DF-NOMA系统的严格正安全容量概率从0.373 3降低到0.047 8, 这表明在相同发射信噪比条件下, ρ_E 越大, MF/DF-NOMA系统的PLS性能越差。这是因为随着 ρ_E 增大, 窃听端SINR增大, 从而导致主信道SINR大于窃听端SINR的概率降低, 使MF/DF-NOMA系统的PLS性能变差。在相同条件下, MF-NOMA系统的SPSC始终高于DF-NOMA系统, 即MF-NOMA系统的PLS性能优于DF-NOMA系统。

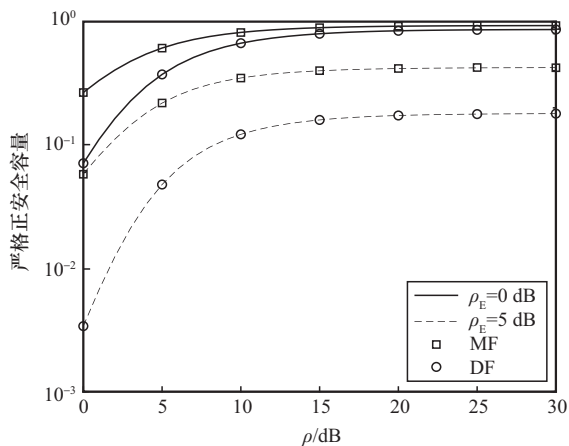


图7 不同 ρ_E 时MF/DF-NOMA系统的SPSC性能曲线

5 结束语

本文研究了多窃听场景中发射端采用TAS, 主、窃听信道所有节点均存在HI的MF协作NOMA系统在Nakagami-m衰落信道的PLS性能问题, 推导出了上述系统的SOP、渐近SOP和SPSC的近似表达式。数值计算和仿真结果一致表明, MF-NOMA系统的PLS性能优于DF-NOMA系统的PLS性能; 发射天线数 T 越大、窃听节点数 L 越小, MF-NOMA系统的PLS性能提升越显著; HI的存在会降低MF-NOMA系统的

PLS性能, 且影响程度主要与HI系数、各链路平均信噪比有关, 并且MF-NOMA系统的PLS性能会因HI所在节点的不同而受到程度各异的影响。鉴于本文重点研究的是具有理想信道状态信息下的MF-NOMA系统的PLS性能, 非理想信道状态信息下硬件损伤的MF-NOMA系统的PLS性能将是未来进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] ASIF M, BAO X, IHSAN A, et al. Securing NOMA 6G communications leveraging intelligent omni-surfaces under residual hardware impairments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024,11(14): 25326-25336.
- [2] DAI L, WANG B, DING Z, et al. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2294-2323.
- [3] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [4] WANG X S, WANG G T, HE L Z, et al. Outage analysis for downlink NOMA with statistical channel state information[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(2): 142-145.
- [5] MAHADY I A, BEDEER E, IKKI S, et al. Sum-rate maximization of NOMA systems under imperfect successive interference cancellation[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(3): 474-477.
- [6] WANG Q, GE J, LI Q, et al. Performance analysis of NOMA for multiple-antenna relaying networks with energy harvesting over Nakagami-m fading channels[C]//Proceedings of the 2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE, 2017: 1-5.
- [7] DO T N, DA COSTA D B, DUONG T Q, et al. Improving the performance of cell-edge users in MISO-NOMA systems using TAS and SWIPT-based cooperative transmissions[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 2(1): 49-62.
- [8] UMAKOGLU I, NAMDAR M, BASGUMUS A, et al. BER performance comparison of AF and DF assisted relay selection schemes in cooperative NOMA systems[C]//Proceedings of the

- 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking. Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [9] LIAU Q Y, LEOW C Y. Successive user relaying in cooperative NOMA system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 921-924.
- [10] CHEN J, YANG L, ALOUINI M S. Physical layer security for cooperative NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4645-4649.
- [11] CUONG N L, HOANG T M, PHUONG N T, et al. Analysis of secrecy outage performance for full duplex NOMA relay systems with appearance of multiple eavesdroppers[J]. Wireless Networks, 2022, 28(7): 3157-3172.
- [12] 丁一凡, 李光球, 李辉. 窃听器随机分布 SWIPT-NOMA 系统的物理层安全[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 133-142.
- DING Y F, LI G Q, LI H. Physical layer security of SWIPT-NOMA systems with randomly distributed eavesdroppers[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 133-142.
- [13] LEI H, ZHANG H, ANSARI I S, et al. On secrecy outage of relay selection in underlay cognitive radio networks over Nakagami-m fading channels[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017, 3(4): 614-627.
- [14] JAISWAL N, PANDEY A, YADAV S, et al. Physical layer security performance of NOMA-aided vehicular communications over Nakagami-m time-selective fading channels with channel estimation errors[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2022, 4: 72-100.
- [15] YU C, KO H L, PENG X, et al. Secrecy outage performance analysis for cooperative NOMA over Nakagami-m channel[J]. IEEE Access, 2019, 7: 79866-79876.
- [16] KIM S W. Modify-and-forward for securing cooperative relay communications[J]. arXiv preprint, 2014, arXiv:1403.6555, 2014.
- [17] 张延良, 田月华, 李兴旺, 等. 基于 MF 协议的协作 NOMA 系统物理层安全性能研究[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(4): 1211-1218.
- ZHANG Y L, TIAN Y H, LI X W, et al. Research on physical layer security performance of cooperative NOMA system based on MF protocol[J]. Journal of Electronics and Information, 2023, 45(4): 1211-1218.
- [18] 罗延翠, 李光球, 叶明珠, 等. 中继选择 NOMA 系统的物理层安全[J]. 电信科学, 2024, 40(3): 116-127.
- LUO Y C, LI G Q, YE M Z, et al. Physical layer security of relay selection NOMA wireless systems[J]. Telecommunication Science, 2024, 40(3): 116-127.
- [19] HUANG G J, SHENG X, LIU H L, et al. Effective capacity analysis of NOMA with transceiver hardware and SIC imperfections[J]. Physical Communication, 2023, 58: 1-8.
- [20] LI M, SELIM B, MUHAIDATS, et al. Effects of residual hardware impairments on secure NOMA-based cooperative systems[J]. IEEE Access, 2019, 8: 2524-2536.
- [21] XU G, ZHAO Z, SONG Z, et al. Symbol error analysis for integrated satellite-terrestrial relay networks with non-orthogonal multiple access under hardware impairments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 12980-12994.
- [22] DING F, WANG H, ZHANG S, et al. Impact of residual hardware impairments on non-orthogonal multiple access based amplify-and-forward relaying networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15117-15131.
- [23] PENG H, QI H, LI X, et al. Hardware impaired modify-and-forward relaying with relay selection: reliability and security[J]. Physical Communication, 2021, 46: 1-10.
- [24] 李美玲, 陈琴, 杨晓霞, 等. 非理想硬件条件下协作 NOMA 系统安全中断性能研究[J]. 电子学报, 2021, 49(7): 1354-1362.
- LI M L, CHEN Q, YANG X X, et al. Research on the secure outage performance of cooperative NOMA systems under non-ideal hardware conditions [J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(7): 1354 - 1362.
- [25] PHU T T, TRAN T D. Analysis of probability of non-zero secrecy capacity for multi-hop networks in presence of hardware impairments over Nakagami-m fading channels[J]. Radio Engineering, 2016, 25(4).
- [26] 李光球. Nakagami 衰落信道上组合 SC / MRC 的性能分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 187-191.
- LI G Q. Performance analysis of combined SC/MRC over Nakagami fading channels[J]. Journal of Radio Science, 2007, 22(2): 187-191.

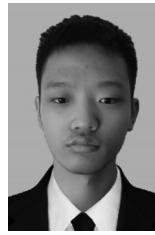
[作者简介]



叶明珠 (1999-), 女, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。



李光球 (1966-), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院教授, 主要研究方向为无线通信、信息论与编码。



高杰 (2001-), 男, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。



张旭 (2001-), 男, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。



王志康 (2000-), 男, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。