

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208785

基于无线携能的协作 NOMA 系统安全性能研究*

邱斌^{1,2} 王伟²

(1. 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室 桂林 541004; 2. 桂林理工大学信息科学与工程学院 桂林 541004)

摘要: 针对中继能量受限的多用户无线窃听场景,提出了一种基于无线携能的协作非正交多址接入(NOMA)安全传输机制并进行了性能分析。该传输机制首先对多天线基站进行最优发射天线选择,引入协作 NOMA 的全双工技术提高传输可靠性与频谱利用率,采用无线携能技术克服中继节点由于功耗过大引起的能量不足问题。为进一步衡量所提传输机制的系统性能,推导了用户的中断概率和安全中断概率并进行了系统性能分析。数值结果表明,通过合理设置 NOMA 功率分配比以及无线携能功率分割比有利于提高系统的性能,所提传输机制相对于协作 NOMA 和传统 NOMA 传输机制安全中断性能分别提高了 33% 与 59%。

关键词: 无线携能;协作中继;非正交多址接入;物理层安全;安全中断概率

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Security performance of cooperative NOMA system based on SWIPT

Qiu Bin^{1,2} Wang Wei²

(1. Guangxi Key Laboratory of Embedded Technology and Intelligent System, Guilin 541004, China;

2. School of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the multi-user wireless eavesdropping scenario with limited energy in relay node, a security transmission scheme is proposed based on the cooperative non-orthogonal multiple access (NOMA) technology and the simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) technology. In this scheme, the transmit antenna selection mechanism is carried out in the multi-antenna base station. Firstly, the full-duplex cooperative relay technology is utilized for improving transmission reliability and spectrum utilization in NOMA system, and the SWIPT technology is utilized for overcoming the energy shortage problem caused by excessive power consumption of the relay node. Furthermore, the closed-form expressions of outage probability and secrecy outage probability are derived for further measuring the system performance. Finally, the effect of key system parameters on system performance is comprehensively analyzed through asymptotic analysis. Numerical results show that the system performance can be improved by reasonably setting the power allocation coefficient of NOMA user and the power splitting ratio of SWIPT user. Compared with the cooperative NOMA and the traditional NOMA transmission mechanism, the proposed scheme has improved the security performance by 33% and 59%, respectively.

Keywords: simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT); cooperative relay; non-orthogonal multiple access (NOMA); physical layer security; secrecy outage probability (SOP)

0 引言

近年来,由于物联网和移动通信技术的快速发展,有限的无线频谱资源变得越发稀缺。非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)技术能够通过功率域复用,从而提高用户的频谱效率和用户公平性,目前受到广

泛关注^[1]。研究表明,在不考虑硬件成本的条件下相对于正交多址接入系统,NOMA 系统可获得较低的中断概率与更高的吞吐量^[2]。

中继协作技术可有效解决无线通信中的无线损耗问题,增强无线链路的可靠性、扩大覆盖范围,实现空间分集^[3]。将中继协作技术引入到 NOMA 系统中近年来受到

收稿日期:2022-01-06

* 基金项目:广西自然科学基金(2018GXNSFBA281057)、广西嵌入式技术与智能系统重点实验室开放基金(2019-2-7)、桂林理工大学博士科研启动基金(GUTQDJ2014042)项目资助

学者的广泛关注。文献[4]提出了基于中继协作 NOMA 的频谱共享机制,在保证主用户质量的同时,也实现了次级用户和速率的最大化。文献[5]分析了半双工和全双工中继 NOMA 网络的用户性能增益。文献[6]在基于协作 NOMA 的 D2D 通信网络中,推导了系统各用户的中断概率。上述所提的协作 NOMA 系统,虽然提高了系统的可靠性和频谱效率。然而,由于无线通信的广播及开放特性,协作 NOMA 系统的物理层安全性仍难以保障。

物理层安全技术能够根据无线信道的随机性和多变特征,在物理层实现信息的安全传输^[7-10]。其中,文献[8]提出了一种基于 NOMA 的波束成形和协作干扰方案,以增强不可信中继网络的物理层安全。文献[9]研究了基于协作 NOMA 的车载网络安全中断性能,其结果表明中继节点工作于全双工模式可以提高系统的频谱利用率。以上文献所提的协作 NOMA 物理层安全研究场景均假设额外独立的中继节点参与协作转发,该模式虽然能够有效提高系统传输可靠性与安全性,也会带来额外的设备开销,同时也常出现不可信中继节点的情况^[10]。实际上,研究用户充当中继的协作 NOMA 系统安全性具有重要研究意义。文献[11]研究了两用户 NOMA 系统的物理层安全,其近端用户充当全双工协作中继,分析了非理想自干扰对所提系统安全性能的影响。然而,在用户协作 NOMA 通信系统中,尤其是在能量受限的物联网通信场景,大部分传感器节点都为电池供电,用户中继节点需要消耗额外的能量辅助传输,可能会出现功耗过高从而导致该节点供能不足的问题。同时,充当中继的“强”用户需要为信道条件差的“弱”用户协作转发信息,若该节点不能正常工作可能会导致系统中的用户均不能正常接收信息。

针对以上面临的挑战,无线携能(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)技术能够在接收信息的同时收集能量,从而有效改善中继协作节点能量受限的问题^[12-13]。目前,SWIPT 主要分为基于功率分割(power splitting, PS)的 PS-SWIPT 模式和基于时间切换(time switching, TS)的 TS-SWIPT 模式。文献[14-15]分别针对两种模式在协作中继网络中的应用进行了系统性能。研究表明,PS-SWIPT 相对于 TS-SWIPT 能有效减少系统所消耗的时隙,从而提高信息的传输效率。文献[16]提出了一种基于 PS-SWIPT 传输机制的中继选择策略,该策略利用最优中继选择算法实现了系统吞吐量最大化。文献[17]针对基于 SWIPT 的协作 NOMA 系统,提出了联合 PS 因子与 NOMA 功率分配系数的设计方案,提高了近端用户的中断性能。然而,以上针对基于 SWIPT 的协作 NOMA 文献,主要集中在提高系统容量和可靠性方面,并未涉及其系统的物理层安全性能。

综上所述,本文针对中继能量受限的多用户无线窃听场景,提出了一种基于 SWIPT 的协作 NOMA 系统安全传输机制,推导了中断概率以及安全中断概率的封闭表达式

并进行了系统性能分析,刻画了系统参数(如 NOMA 功率分配比、PS 功率分割比及天线数量等)对系统可靠性以及物理层安全性能的影响。

1 系统模型

如图 1 为本文所提系统模型,该模型包括一个多天线的基站(base station, BS)、两个合法接收用户(其中 D_1 为强用户, D_2 为弱用户)和一个窃听用户(E)。BS 配置的天线数为 N , D_1 用户为双天线用户, D_2 用户与 E 用户为单天线用户。本模型中 D_1 用户能量受限,工作于全双工(full duplex, FD)模式,协助 D_2 用户进行信息传输。假设 D_1 用户处于 PS-SWIPT 模式,能够同时进行信息传输和能量收集。考虑窃听端 E 的窃听范围覆盖 BS 与中继 D_1 ,且工作于被动窃听模式,使用并行干扰消除技术进行信号解码,以实现最大限度地窃听^[18]。假设 BS 与 D_2 用户之间因为路径损失和障碍物阻挡,不存在直接链路。 D_2 用户接收 BS 用户的信息需要通过 D_1 用户进行译码转发(decode and forward, DF)。假设任何两个节点之间的信道都经历准静态平坦瑞利衰落。 $h_{S_n D_1}$ ($n=1, 2, \dots, N$), h_1 , h_{SE} , $h_{D_1 E}$ 分别表示链路 $BS \rightarrow D_1$, $D_1 \rightarrow D_2$, $BS \rightarrow E$ 以及 $D_1 \rightarrow E$ 的信道系数,且信道增益 $|h_{S_n D_1}|^2$ 、 $|h_1|^2$ 、 $|h_{SE}|^2$ 和 $|h_{D_1 E}|^2$ 分别服从参数为 $\Omega_{S_n D_1}$ 、 $\Omega_{D_1 D_2}$ 、 Ω_{SE} 以及 $\Omega_{D_1 E}$ 的指数分布。另外,假设 D_1 的自干扰信道系数为 h_{D_1} , 其信道增益为 $|h_{D_1}|^2$ 服从参数为 Ω_{D_1} 的指数分布。

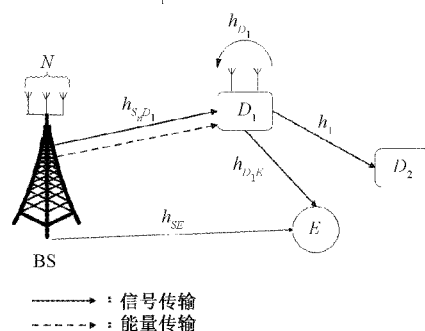


图 1 基于 SWIPT 的协作 NOMA 系统模型

2 基于 SWIPT 的协作 NOMA 信息传输

2.1 最优天线选择方案

本文采用最优天线选择技术来获得分集增益^[19]。BS 根据不同天线到用户的信道增益,选择一根最优的天线 n^* 发送叠加的用户信息。具体步骤如下:

步骤 1) BS 对所有用户以及中继节点发送信号,从中找到能使 BS 到中继 D_1 信道增益最大的最佳发送天线 n^* , 最佳天线选择准则如下:

$$n^* = \arg \max_{n=1, \dots, N} (|h_{S_n D_1}|^2) \quad (1)$$

步骤 2) 最优天线按时发送叠加的用户信息,其他天线保持静默状态。

2.2 信息传输过程

根据 NOMA 的工作原理,假设 BS 发送的叠加信号为 $X_S^{NOMA} = \sqrt{\alpha_1 P_S} x_1 + \sqrt{\alpha_2 P_S} x_2$, 其中 P_S 为基站发射功率, x_1 和 x_2 分别为两用户的单位功率信号, α_1 和 α_2 分别为两用户的功率分配系数, 满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 且 $\alpha_1 < \alpha_2$ 。另外, 假设 D_1 用户用于能量收集的功率分割因子为 β ($\beta \in (0, 1)$), 用于信息解码的功率分割因子为 $1 - \beta$ 。因此, 根据 NOMA 机制的连续干扰消除技术, D_1 用户解码 x_2 信号的信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 为:

$$\gamma_{x_2 \rightarrow D_1} = \frac{(1 - \beta)\alpha_2 P_S |h_{S_{n^*} D_1}|^2}{(1 - \beta)\alpha_1 P_S |h_{S_{n^*} D_1}|^2 + \omega P_1 |h_{D_1}|^2 + \sigma_0^2} \quad (2)$$

其中, σ_0 为终端高斯噪声, $\omega \in (0, 1)$ 为自干扰的剩余系数, 表示 FD 中继处的自干扰消除的残留水平。假设完美 SIC, D_1 用户解码 x_1 的 SINR 为:

$$\gamma_{x_1 \rightarrow D_1} = \frac{(1 - \beta)\alpha_1 P_S |h_1|^2}{\omega P_S |h_{D_1}|^2 + \sigma_0^2} \quad (3)$$

根据 PS 协议, D_1 处收获的能量为:

$$E = \frac{T}{2} \eta \beta (\rho_S |h_{S_{n^*} D_1}|^2 + P_1 |h_{D_1}|^2) \quad (4)$$

其中, η ($0 < \eta < 1$) 为能量转换系数, T 为传输时间。则发射功率 P_1 在 D_1 可表示为:

$$P_1 = \frac{E}{T/2} = \frac{\eta \beta P_S |h_{S_{n^*} D_1}|^2}{1 - \eta \beta |h_{D_1}|^2} \quad (5)$$

其中, 假设 P_S, P_1 为 BS 处的归一化传输功率。 D_2 用户解码 x_2 的 SINR 为:

$$\gamma_{x_2 \rightarrow D_2} = \frac{\eta \beta \alpha_2 P_S |h_{S_{n^*} D_1}|^2 |h_1|^2}{(1 - \eta \beta |h_{D_1}|^2) \sigma_0^2} \quad (6)$$

假设窃听用户 E 具有多用户检测能力^[20], 则窃听用户接收的两用户信号的 SINR 可分别表示为:

$$\gamma_{SE_1} = \frac{P_S \alpha_1 |h_{S_{n^*} E}|^2}{P_S \alpha_2 |h_{S_{n^*} E}|^2 + P_1 |h_{D_1 E}|^2 + \sigma_E^2} \quad (7)$$

$$\gamma_{SE_2} = \frac{P_S \alpha_2 |h_{S_{n^*} E}|^2}{P_S \alpha_1 |h_{S_{n^*} E}|^2 + P_1 |h_{D_1 E}|^2 + \sigma_E^2} \quad (8)$$

3 中断概率分析

中断概率定义为实际数据传输速率低于目标传输速率时发生的概率, 其是衡量系统传输可靠性的重要性能指标。分别定义 R_1 和 R_2 为 x_1 和 x_2 的目标传输速率。BS 采用最优天线选择技术, D_1 的中断概率可表示为:

$$P_{op, D_1} = 1 - \Pr(\gamma_{x_2 \rightarrow D_1} \geq 2^{R_1} - 1, \gamma_{x_1 \rightarrow D_1} \geq 2^{R_1} - 1) = 1 - \int_0^\infty (1 - F_{|h_{S_{n^*} D_1}|^2}(\frac{\omega \rho x + 1}{(1 - \beta)\Omega_{SD_1}})\theta) f_{|h_{D_1}|^2}(x) dx \quad (9)$$

其中, $\theta = \max(\frac{R_2}{\alpha_2 \rho - R_2 \alpha_1 \rho}, \frac{R_1}{\alpha_1 \rho})$, $\rho = \frac{P_S}{\sigma_0^2}$ 。

式(9)中 $|h_{S_{n^*} D_1}|^2$ 的分布函数以及 $|h_{D_1}|^2$ 的概率密度函数可分别表示为:

$$F_{|h_{S_{n^*} D_1}|^2}(x) = 1 - \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} (-1)^{n-1} \exp(-\frac{nx}{\Omega_{S_{n^*} D_1}}) \quad (10)$$

$$f_{|h_{D_1}|^2}(x) = \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} (-1)^{n-1} \frac{n}{\Omega_{D_1}} \exp(-\frac{nx}{\Omega_{D_1}}) \quad (11)$$

进一步, 根据式(10)及(11), D_1 的中断概率可表示为:

$$\begin{aligned} P_{op, D_1} &= 1 - \Pr(\gamma_{x_2 \rightarrow D_1} \geq R_1, \gamma_{S_{n^*} D_1} \geq R_1) = \\ &1 - \int_0^\infty (1 - F_{|h_{S_{n^*} D_1}|^2}(\frac{\omega \rho x + 1}{(1 - \beta)\Omega_{S_{n^*} D_1}})\theta) f_{|h_{D_1}|^2}(x) dx = \\ &1 - \int_0^\infty \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} (-1)^{n-1} \exp(\frac{n(\omega \rho x + 1)\theta}{(1 - \beta)\Omega_{S_{n^*} D_1}}) \frac{1}{\Omega_{S_{n^*} D_1}} \times \\ &\exp(-\frac{x}{\Omega_{S_{n^*} D_1}}) dx = \\ &1 - \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} (-1)^{n-1} \frac{(1 - \beta)\Omega_{S_{n^*} D_1}}{n\omega\rho\theta\Omega_{S_{n^*} D_1} + (1 - \beta)\Omega_{S_{n^*} D_1}} \times \\ &\exp(-\frac{n\theta}{(1 - \beta)\Omega_{S_{n^*} D_1}}) \end{aligned} \quad (12)$$

同理, 用户 D_2 的中断概率可表示为:

$$\begin{aligned} P_{op, D_2} &= [1 - \Pr(\min(\gamma_{x_2 \rightarrow D_1}, \gamma_{D_1 D_2}) \geq R_2)] = \\ &1 - \Pr(|h_{S_{n^*} D_1}|^2 \geq \frac{R_2 \omega \rho |h_{D_1}|^2 + R_2}{\alpha_2 \rho - \alpha_1 \rho R_2}) \times \Pr(|h_1|^2 \geq \frac{R_2}{\rho}) = \\ &1 - \exp(-\frac{R_2}{\rho \Omega_{D_1 D_2}}) \times \int_0^\infty (1 - F_{|h_{S_{n^*} D_1}|^2}(\frac{R_2 \omega \rho x + R_2}{\alpha_2 \rho - \alpha_1 \rho R_2})) \times \\ &f_{|h_{D_1}|^2}(x) dx = \\ &1 - \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} (-1)^{n-1} \frac{(\alpha_2 \rho - \alpha_1 \rho \epsilon_2)\Omega_{S_{n^*} D_1}}{n\omega\rho\epsilon_2\Omega_{D_1 D_2} + (\alpha_2 \rho - \alpha_1 \rho \epsilon_2)\Omega_{S_{n^*} D_1}} \times \\ &\exp(-\frac{n\epsilon_2}{(\alpha_2 \rho - \alpha_1 \rho \epsilon_2)\Omega_{S_{n^*} D_1} - \rho \Omega_{D_1 D_2}}) \end{aligned} \quad (13)$$

由此, 整个系统的中断概率可进一步表示为:

$$P_{op} = 1 - (1 - P_{op, D_1})(1 - P_{op, D_2}) \quad (14)$$

4 安全中断概率分析

安全中断概率定义为保密速率低于目标安全速率时发生的概率, 其中保密速率是指合法用户的通信链路和窃听者的通信链路速率之差。

4.1 用户 D_1 的安全中断概率

假设两个合法用户 D_1, D_2 的目标安全速率分别为 R_{S_1}, R_{S_2} 。以用户 D_1 为例, C_M 为主信道的容量, C_E 为窃听信道容量, 则保密容量可表示为:

$$C_S = \max\{C_M - C_E, 0\} \quad (15)$$

当窃听节点采用最大比合并 MRC 接收用户的信息时, 用户 D_1 的安全中断概率为:

$$P_{sop, D_1} = Pr\{C_S < R_{S_1}\} \quad (16)$$

根据 Shannon 定理,用户 D_1 的安全中断概率可表示为:

$$P_{sop,D_1} = \Pr\{\log_2(1 + \gamma_{S_{n^*}D_1}) - \log_2(1 + \gamma_{SE_1}) < R_{S_1}\} \quad (17)$$

其中, $\gamma_{S_{n^*}D_1}$ 为用户 D_1 的接收信噪比, γ_{SE_1} 为窃听用户对 D_1 用户进行监测的信噪比。式(17)可进一步表示为:

$$P_{sop,D_1} = \Pr\{\log_2(1 + \gamma_{S_{n^*}D_1}) - \log_2(1 + \gamma_{E_1}) < R_{S_1}\} = \int_0^\infty F_{\gamma_{S_{n^*}D_1}}(2^{R_{S_1}}(1+x) - 1)f_{\gamma_{SE_1}}(x)dx \quad (18)$$

式中: $F_{\gamma_{S_{n^*}D_1}}(x)$ 表示 $\gamma_{S_{n^*}D_1}$ 的累积分布函数, $f_{\gamma_{SE_1}}(x)$ 表示 γ_{SE_1} 的概率密度函数。

进一步,根据瑞利衰落信道的数学统计性,可以得到:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{S_{n^*}D_1}} &= \Pr\{\gamma_{S_{n^*}D_1} < x\} = \\ \Pr\left\{\frac{(1-\beta)\alpha_1\rho |h_{S_{n^*}D_1}|^2}{\omega\rho |h_{D_1}|^2 + 1} < x\right\} &= \\ \Pr\{|h_{S_{n^*}D_1}|^2 < \frac{\omega\rho |h_{D_1}|^2 + 1}{(1-\beta)\alpha_1\rho}x\} &= \\ {}^{(a)}\Pr\{U_1 < \frac{\omega\rho U_2 + 1}{(1-\beta)\alpha_1\rho}x\} &= \\ 1 - \frac{1}{\Omega_{D_1}}\exp\left(-\frac{x}{\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1}\right) \times & \\ \int_0^\infty \left(-\left(\frac{\omega\rho x}{(1-\beta)\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1} + \frac{1}{\Omega_{D_1}}\right)U_2\right)dU_2 & \quad (19) \end{aligned}$$

其中 $U_1 = |h_{S_{n^*}D_1}|^2, U_2 = |h_{D_1}|^2$ 。 $\gamma_{S_{n^*}D_1}$ 的累积分布函数为:

$$F_{\gamma_{S_{n^*}D_1}}(x) = [1 - \exp\left(-\frac{x}{(1-\beta)\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1}\right)] \quad (20)$$

$$f_{\gamma_{SE_1}}(x) = \frac{1}{\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1} \exp\left(-\frac{x}{(1-\beta)\Omega_{SE_1}\rho\alpha_1}\right) \quad (21)$$

将式(20)及(21)代入式(19),最终得到用户 D_1 的安全中断概率为:

$$\begin{aligned} P_{sop,D_1} &= \int_0^\infty F_{\gamma_{S_{n^*}D_1}}(2^{\epsilon_1}(1+x) - 1)f_{\gamma_{SE_1}}(x)dx = \\ \int_0^\infty [1 - \exp\left(-\frac{x}{(1-\beta)\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1}\right)] \frac{1}{\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1} \times & \\ \exp\left(-\frac{x}{(1-\beta)\Omega_{SE_1}\rho\alpha_1}\right)dx &= \\ \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \exp\left(-\frac{n(2^{R_{S_1}} - 1)}{(1-\beta)\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1}\right) \frac{1}{\Omega_{SE_1}\rho\alpha_1} \times & \\ \int_0^\infty \exp\left(-\frac{n2^{R_{S_1}}x}{(1-\beta)\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1} - \frac{x}{(1-\beta)\Omega_{SE_1}\rho\alpha_1}\right)dx & \quad (22) \end{aligned}$$

其中, Φ_1 表示为:

$$\Phi_1 = \frac{1}{\frac{n2^{R_{S_1}}}{\Omega_{D_1E}\rho\alpha_1} + \frac{1}{\Omega_{SE_1}\rho\alpha_1}} \quad (23)$$

由此可得,用户 D_1 的安全中断概率表示为:

$$\begin{aligned} P_{sop,D_1} &= \int_0^\infty [1 - \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1}\right)] \frac{1}{\Omega_{SE_1}\rho\alpha_1} \times \\ \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{SE_1}\rho\alpha_1}\right)dx &= \\ \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \exp\left(-\frac{n(2^{R_{S_1}} - 1)}{(1-\beta)\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1}\right) \times & \\ \frac{\Omega_{D_1E}}{(1-\beta)2^{R_{S_1}}\Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1 + \Omega_{S_{n^*}D_1}\rho\alpha_1\Omega_{D_1E}} & \quad (24) \end{aligned}$$

4.2 用户 D_2 的安全中断概率

同理,用户 D_2 的保密容量可表示为:

$$C_{D_2} = (\log(1 + \gamma_{D_1D_2}) - \log(1 + \gamma_{SE_2})) \quad (25)$$

用户 D_2 的安全中断概率 P_{SOP,D_2} 同样可表示为:

$$P_{sop,D_2} = \Pr\{C_{D_2} < R_{S_2}\} = \int_0^\infty F_{\gamma_{D_1D_2}}(2^{R_{S_2}}(1+x) - 1)f_{\gamma_{SE_2}}(x)dx \quad (26)$$

与 D_1 的求解过程类似:

$$F_{\gamma_{D_1D_2}}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{(1-\beta)\Omega_{D_1D_2}\rho(\alpha_2 - \alpha_1x)}\right) \quad (27)$$

$$f_{\gamma_{D_1D_2}}(x) = \frac{\alpha_2}{\Omega_{D_1D_2}\rho(\alpha_2 - \alpha_1x)^2} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{D_1D_2}\rho(\alpha_2 - \alpha_1x)}\right) \quad (28)$$

则用户 D_2 的安全中断概率进一步表示为:

$$\begin{aligned} P_{SOP,D_2} &= \int_0^\infty F_{\gamma_{D_1D_2}}(2^{R_{S_2}}(1+x) - 1)f_{\gamma_{SE_2}}(x)dx = \\ 1 - \int_0^\eta \underbrace{\exp\left(-\frac{2^{R_{S_2}}(1+x) - 1}{\Omega_{D_1D_2}\rho(\alpha_2 - \alpha_1(2^{R_{S_2}}(1+x) - 1))}\right)}_{\phi_2} f_{\gamma_{SE_2}}(x)dx & \quad (29) \end{aligned}$$

其中, $\eta = \frac{1}{2^{R_{S_2}}\alpha_1} - 1 < \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ 。本文利用高斯-切比雪夫求积引理对 ϕ_2 进行求解。引理定义如下:

如果权函数 $\rho(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$, 区间为 $[-1, 1]$, 则有

下列关系式:

$$\int_{-1}^1 \frac{f(x)}{\sqrt{1-x^2}}dx \approx \sum_{k=0}^{N_T} A_k f(x_k) \quad (30)$$

其中, $A_k = \frac{\pi}{N_T + 1}, x_k = \cos\left(\frac{2k+1}{2N_T+2}\pi\right)$ 且 $k = 0, 1, 2, \dots, n, N_T$ 为表示精度的量。若积分区间不是 $[-1, 1]$, 则通过如下公示进行变换:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2} \int_1^{-1} f\left(\frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2}t\right)dt \quad (31)$$

根据以上引理, ϕ_2 表表示为:

$$\phi_2 = \frac{\pi\alpha_2}{2N\Omega_{D_1D_2}\rho\alpha_1} \sum_{i=0}^N \frac{1}{(\alpha_2 - \frac{\alpha_1\eta}{2}(1+\phi_i))^2} J_1\left(\frac{\eta}{2}(1+\phi_i)\right) \times \sqrt{1-\phi_i^2} \quad (32)$$

其中:

$$\phi_i = \cos\left(\frac{2i-1}{2N_T}\pi\right) \quad (33)$$

$$J_1(x) = \exp\left(-\left(\frac{2^{R_{S_2}}(1+x)-1}{\Omega_{D_1 D_2} \rho (\alpha_2 - \alpha_1 (2^{R_{S_2}}(1+x)-1))} + \frac{x}{\Omega_{D_1 D_2} \rho (\alpha_2 - \alpha_1 x)}\right)\right) \quad (34)$$

进一步通过化简,用户 $\Omega_{SD_1} = \Omega_{D_1 D_2} = 8$ 的安全中断概率可表示为:

$$P_{sop, D_2} = 1 - \frac{\eta(\alpha_2 - \alpha_1)}{2\Omega_{D_1 D_2} \rho} \times \frac{\pi}{N} \times \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^{N_T} \binom{N}{i} \frac{1}{(\alpha_2 - \frac{\alpha_1 \eta}{2}(1 + \phi_i))^2} J_1\left(\frac{\eta}{2}(1 + \phi_i)\right) \times \sqrt{1 - \phi_i^2} \quad (35)$$

最终整个系统的安全中断概率表示为:

$$P_{sop} = 1 - (1 - P_{sop, D_1})(1 - P_{sop, D_2}) \quad (36)$$

5 数值结果与分析

本节分析基于无线携能的协作 NOMA 系统性能。无特别说明情况下,相关仿真参数设置如下: $\sigma_w^2 = 1, \Omega_{SD_1} = \Omega_{D_1 D_2} = 8, \Omega_{D_1 E} = 4, \Omega_{D_1} = 0.8, N_T = 100, R_1 = R_{S_1} = 0.1 \text{ bit/s/Hz}, R_2 = R_{S_2} = 0.06 \text{ bit/s/Hz}$ 。

图 2 描述了自干扰系数对系统中断性能的影响。由图 2 可以看出,当基站信号发射功率一定时,非理想中继系统($\omega \neq 0$)的中断概率大于理想中继系统($\omega = 0$)的中断概率,表现为非理想情况下自干扰程度越高,中断性能越差。图 3 描述了 D_1 用户 SWIPT 功率分割因子对系统中断性能的影响。由图 3 可知,功率分割因子的数值越大,意味着分配给 D_1 用户进行信息解码的功率就越小,采用 DF 解码发生错误的概率就越大,故中断性能下降。因此,为了能够有效提高 NOMA 系统的传输效率可以适当降低用户无线携能功率分割因子。

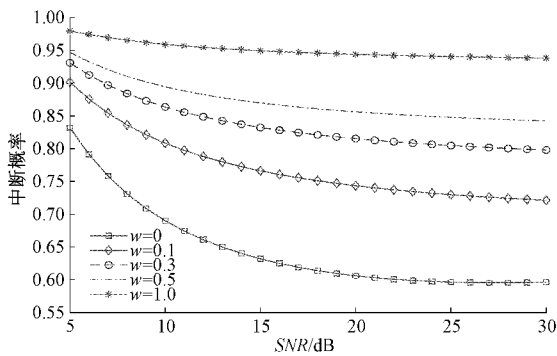


图 2 全双工中继中断概率随自干扰系数变化的对比

图 4 描述了用户功率分配系数与 SWIPT 功率分割因子对 NOMA 系统中断性能的影响。当 β 一定时,系统中断

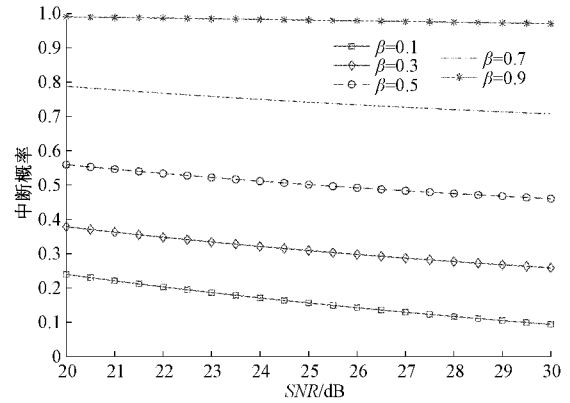


图 3 D_1 用户的功率分割因子对系统中断概率影响

概率随 α_1 的增大而减小,这是因为在全双工中继网络中存在剩余自干扰影响。若 D_1 用户功率分配系数越大则会加大自干扰的影响,分配给 D_2 用户进行信息解码的功率也越小,采用 DF 解码发生错误的概率就越大,故中断性能下降。同理, α_1 一定时,系统中断概率随 β 的增大而增大。由此可见,通过合理设置 NOMA 功率分配比以及 PS 功率分割比有利于提高系统的性能。

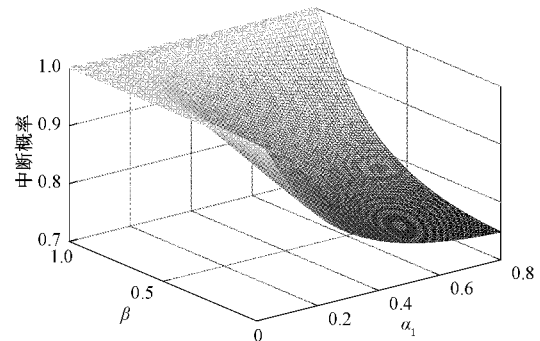


图 4 用户功率分配系数与 SWIPT 功率分割因子对 NOMA 系统的中断性能影响图

图 5 与 6 分别表示用户 D_1 与 D_2 安全中断概率与基站天线数目的关系。由图可知,所提系统采用最优天线选择方案,天线数目的增加使得空间分集增益增大,安全中断概率降低。然而,增加天线数同样会增加系统的硬件成本与复杂度,故天线数目的选择应综合考虑传输成本与系统性能的需求。

图 7 描述了当基站天线数 $N=4, R_{S_1} = 0.5$ 时,在不同的安全目标速率下 NOMA 用户功率分配系数对系统安全性能的影响。当 $0 < \alpha_1 < 0.3$ 时,随着功率分配系数 α_1 的增大,可以看出系统中断概率先减小再增大。这是由于 α_1 增大时, D_2 用户所分配到的功率逐渐减小, D_1 用户通过 SWIPT 技术转发信息给 D_2 用户,由于 D_2 用户与 D_1 用户之间的信道增益明显优于窃听链路之间的信道增益,所以 D_2 用户的安全中断概率会先减小。然而,当 α_1 继续增大时,会导致 D_2 用户信号无法被正确解码,因此系统的安全中

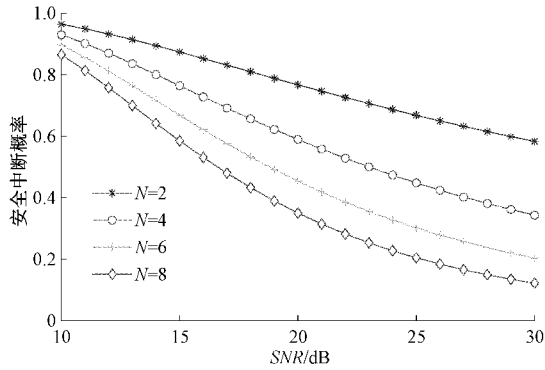


图 5 D_1 用户的安全中断概率与基站天线数的关系

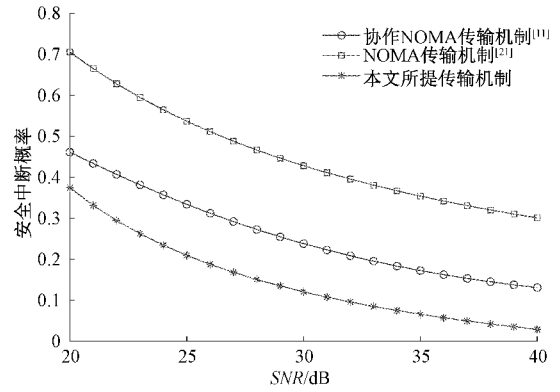


图 8 本文所提传输机制与其它传输机制的性能对比

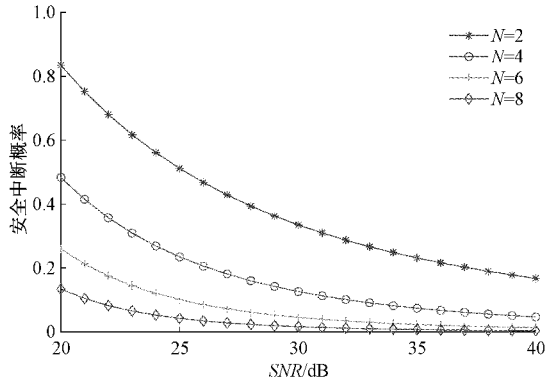


图 6 D_2 用户的安全中断概率与基站天线数的关系

断概率会随之增大。此外,随着 R_{s_2} 的增大,保密容量小于目标安全速率的概率也将会随之变大,故安全性能降低。

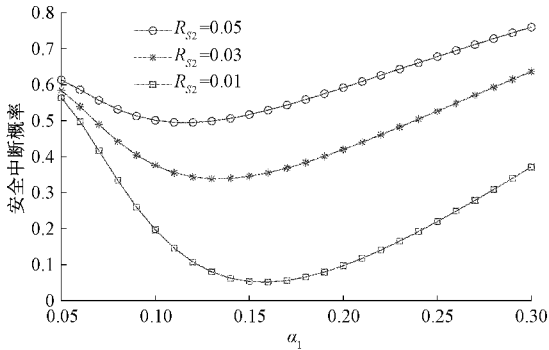


图 7 不同的目标安全速率下功率分配系数对系统安全性能的影响

图 8 描述了当 $\alpha_1 = 0.3, \beta = 0.5$ 时,不同传输机制下安全中断概率随 SNR 的变化曲线。由图可知,相同条件下本文所提传输机制优于文献[11]所提的协作 NOMA 传输机制以及文献[21]所提的 NOMA 传输机制。这是因为所提机制采用 SWIPT 技术能克服中继节点由于功耗过大引起的能量不足问题,同时中继节点产生协作干扰信号混淆窃听者,从而提高了信息的安全性。如当 $SNR = 30$ 时,本文所提传输机制相对于协作 NOMA 和 NOMA 传输机制,安全中断性能分别提高了 33%和 59%。

6 结 论

本文针对中继能量受限的多用户无线窃听场景,提出了一种基于无线携能的协作 NOMA 安全传输机制。该机制首先采用最优天线选择技术获得多天线基站的分集增益,其次通过协作 NOMA 的全双工技术提高传输可靠性与频谱利用率,最后采用无线携能技术克服中继节点由于功耗过大引起的能量不足问题,中继无线携能节点产生协作干扰信号混淆窃听者,从而提高信息传输的安全性。数值结果表明,所提机制相对于协作 NOMA 和传统 NOMA 传输机制具有优越性。如何在系统安全中断性能的约束下,结合智能反射面(IRS)辅助通信技术的优势,进一步联合优化多天线基站发送波束成形和 IRS 相移矩阵,实现系统总能效最大化是未来的主要研究方向之一。

参考文献

- [1] PAN H, LIANG J, LIEW S C. Practical NOMA-based coordinated direct and relay transmission[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10 (1): 170-174.
- [2] IM G, LEE J H. Outage probability for cooperative NOMA systems with imperfect SIC in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4):692-695.
- [3] 彭艺,张中,朱豪,等. 联合机器学习的 D2D 通信多中继选择机制[J]. 电子测量与仪器报, 2020, 34 (3): 149-154.
- [4] CHEN B, YU C, CHEN Y, et al. A novel spectrum sharing scheme assisted by secondary NOMA relay[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2018, 7(5): 732-735.
- [5] LU L, DING Z, CHEN J, et al. Design of secure NOMA against full duplex proactive eavesdropping [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8 (4): 1090-1094.
- [6] YU C, KO H L, PENG X, et al. Jammer-aided secure

- communications for cooperative NOMA systems [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(11): 1935-1939.
- [7] 徐鑫, 金梁. NOMA 系统中基于协作干扰的物理层安全方案[J]. 信号处理, 2017, 33(6):836-844.
- [8] LV L, ZHOU F, CHEN J, et al. Secure cooperative communications with an untrusted relay: A NOMA-inspired jamming and relaying approach [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2019;3191-3205.
- [9] XIE W, LIAO J, YU C, et al. Physical layer security performance analysis of the FD-based NOMA-VC system[J]. IEEE Access, 2019, 7:115568-115573.
- [10] HE B, LYU L, YANG L et al. Enhancing secrecy for NOMA untrusted relay networks with user scheduling and jamming [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(12):2682-2686.
- [11] 李美玲, 李莹, SAMI M, 等. 非理想干扰删除下全双工中继 NOMA 系统的物理层安全性能研究[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 183-189.
- [12] 吴慧明, 王海涛, 鲍丹阳, 等. 基于无线信能同传技术的波束成型研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(10): 138-143.
- [13] ZHONG B, CHEN L, TANG Z J. Ergodic rate analysis for full-duplex NOMA networks with energy harvesting[J]. Science China, 2021, 64(8): 255-256.
- [14] QU W, CHENG X, CHEN C, et al. Full-duplex SWIPT relaying based on spatial-modulation[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019, 3(4):1012-1022.
- [15] YUAN Y, XU Y, YANG Z, et al. Energy efficiency optimization in full-duplex user-aided cooperative SWIPT NOMA systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(8):5753-5767.
- [16] 李陶深, 施安妮, 王哲, 等. 基于 SWIPT 的吞吐量最优化 NOMA 全双工中继选择策略[J]. 通信学报, 2021, 42(5):87-97.
- [17] LIU Y, DING H, SHEN J, et al. Outage performance analysis for SWIPT-based cooperative non-orthogonal multiple access systems [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(9):1501-1505.
- [18] CAO Y, WANG S, JIN M, et al. Power optimization for enhancing secrecy of cooperative user relaying NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7):8008-8012.
- [19] DANG H P, NGUYEN M, DO D, et al. Joint relay selection full-duplex and device-to-device transmission in wireless powered NOMA networks [J]. IEEE Access, 2020, 8:82442-82460.
- [20] FENG Y, YANG Z, YAN S. Non-orthogonal multiple access and artificial-noise aided secure transmission in FD relay networks [C]. 2017 IEEE Globecom Workshops, 2017:1-6.
- [21] ZHANG C, JIA F, ZHANG Z, et al. Physical layer security designs for 5G NOMA systems with a stronger near-end internal eavesdropper[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11):13005-13017.

作者简介

邱斌(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为无线携能通信、物理层安全。

E-mail: qiubin1122@126.com

王伟, 硕士研究生, 主要研究方向为无线携能通信、物理层安全。

E-mail: 974747584@qq.com