

文章编号:1007-5321(2022)01-0115-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2021-085

车联网 CR-NOMA 系统物理层安全性能分析

李美玲¹, 杨晓霞¹, 成文杰¹, 路兆铭²

(1. 太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024; 2. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 认知无线电—非正交多址接入 (CR-NOMA) 能够满足第 5 代移动通信系统的大规模连接, 实现车联网的低时延、低功耗和广覆盖。针对协作 CR-NOMA 的车联网络, 基于保密中断概率分析了主用户的物理层安全传输性能, 并研究了次用户发射信噪比、次用户数量、保密速率以及功率分配系数对主用户保密中断概率的影响。仿真结果表明, 在窃听者存在的情况下, 通过增大次用户发射信噪比、选取次用户数量以及合适的目标速率能够降低主用户的保密中断概率, 从而提升主用户系统的物理层安全性能。

关键词: 认知无线电; 非正交多址接入; 物理层安全; 保密中断概率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Physical Layer Security for CR-NOMA System in Vehicle-to-Everything

LI Meiling¹, YANG Xiaoxia¹, CHENG Wenjie¹, LU Zhaoming²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Cognitive radio non-orthogonal multiple access (CR-NOMA) can meet large-scale connection requirements of the fifth generation of mobile communications system, and satisfy the demands of low latency, low power consumption and wide coverage of vehicle-to-everything communications. The physical layer security of the primary user of cooperative CR-NOMA network based on vehicle-to-everything is analyzed by deriving the secrecy outage probability. The influences of the transmission signal-to-noise ratio of secondary user, the number of secondary users, the target rate and the power allocation coefficient on the secrecy outage probability of primary user are studied. Both analysis and simulation results show that, in the presence of eavesdropper, the secrecy outage probability of the primary user of the considered network can be reduced by increasing the transmission signal-to-noise ratio of secondary user, appropriately selecting the number of secondary users and setting a proper target rate to improve the physical layer security.

Key words: cognitive radio; non-orthogonal multiple access; physical layer security; secrecy outage probability

随着第 5 代移动通信系统 (5G, the fifth generation of mobile communications system) 的迅速发展,

基于 5G 的应用以及学术研究需求逐渐增大, 对于开源 5G 的研讨迫在眉睫。探讨 5G 领域发展新

收稿日期: 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62001320); 中央引导地方科技发展资金项目 (YDZJSX2021A037); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2021-133); 山西省研究生教育创新项目 (2019SY491, 2020SY419)

作者简介: 李美玲 (1982—), 女, 教授, 硕士生导师。

通信作者: 杨晓霞 (1995—), 女, 硕士生, 邮箱: s20180393@stu.tyust.edu.cn。

技术、新动力、新趋势,规划开源 5G 联盟下一步发展方向是现在的工作要点。未来车联网 (V2X, vehicle-to-everything) 通信会有大量的设备接入,为保证车辆与其他网络节点的通信,V2X 对时延、功耗和覆盖能力要求严格,非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 通过在相同的资源块上同时传输多个信号从而提高系统吞吐量,可以实现 V2X 大规模连接通信^[1];而认知无线电技术 (CR, cognitive radio) 通过智能接入方式,可以实现异构设备的端到端通信,降低通信时延,而在提高频谱利用率的同时实现 V2X 设备接入^[2]。研究表明,NOMA 与 CR 的结合可以实现更加智能的通信,更好地满足 5G 大规模连接,支持低速率和低时延需求^[3]。

Lv 等^[4]将 NOMA 技术与 CR 网络结合,研究了认知用户的频谱共享问题。Liu 等^[5]研究了 CR-NOMA 系统中,接收端的主用户 (PU, primary user) 优先解码模式和次用户 (SU, secondary user) 优先解码模式,针对系统吞吐量对 2 种模式进行了分析。Kumar 等^[6]考虑了 CR-NOMA 系统的 2 种中继协议,即解码转发 (DF, decode-and-forward) 协议和放大转发协议,并分析了这 2 种中继协议下的中断概率,比较了 2 种协议下的中断性能。

在海量开放的设备接入环境下,V2X 安全受到严重挑战。Shannon 等^[7]和 Wyner 等^[8]从物理层安全的角度提出了利用无线信道的物理特性来防止无线通信中的窃听行为,提出了基于物理层的安全传输技术实现从源到目的端的可靠传输。目前,物理层安全技术主要应用于两个方面,一方面是在主信道的可靠性优于窃听信道的前提下,为了提高系统的可靠性能,可以通过计算窃听信道的保密容量来分析系统的安全性能,也可以通过计算保密中断概率 (SOP, secrecy outage probability) 来分析系统的可靠性能;另一方面是将无线通信系统中已知信道的特点和传统的加密理论相结合,以达到提升密钥管理安全的目的^[9]。

Zhou 等^[10]在 CR-NOMA 网络中考虑次网络采用 NOMA 传输,当网络中的能量采集设备不可靠时,在主基站和次基站利用人工噪声方法实现系统的安全传输。Xiang 等^[11]则基于集中式 CR-NOMA 网络,PU 基于 NOMA 传输,考虑次基站作为中继辅助 PU 传输,同时 SU 作为潜在的窃听者,对 PU 的安

全中断行为进行了研究。Nandan 等^[12]基于 CR-NOMA 网络,考虑 1 个簇蜂窝网络中存在 1 个 SU 和 1 个 PU,其他簇网络的 PU 为窃听者,分析了 1 个簇蜂窝网络中 PU 和 SU 的安全中断行为。Li 等^[13]同样基于 CR-NOMA 网络,在衡量 PU 的安全传输性能时考虑 SU 对 PU 的干扰影响,提出了协作 NOMA 传输方案以增强 PU 的安全传输性能。

目前,已有大量文献针对 CR-NOMA 网络进行了研究,而将 CR 与 NOMA 技术相结合应用于 V2X 网络,尚有诸多问题需要研究。因此,考虑基于 V2X 存在窃听者的多 SU 协作的 CR-NOMA (CR-NOMA-MSU-E) 系统,对其物理层安全传输性能进行了研究,在瑞利衰落信道条件下,推导了 DF 模式下 PU 的 SOP,研究了 SU 发射信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio)、SU 数量、保密速率以及功率分配系数对 PU 的 SOP 的影响。结果表明,改变 SU 发射 SNR、SU 数量、保密速率以及功率分配系数会对 PU 的 SOP 产生不同程度的影响,即存在窃听者的 CR-NOMA 系统的物理层安全性能受到多方面的影响。

1 系统模型

DF 模式下 CR-NOMA-MSU-E 系统模型如图 1 所示。该模型由 1 个基站 (BS, base station), N 个 SU, 1 个 PU 和 1 个窃听者 (Eve, eavesdropper) 组成,在该模型中不考虑 BS 到 PU 的直传链路。而该模型普遍适用于 V2X,在基于 V2X 通信的下行 CR-NOMA 场景中,BS 为路侧单元,SU 为距离 BS 较近的无人驾驶车辆,PU 为距离 BS 较远的无人驾驶车辆,Eve 为窃听者。在无人驾驶技术中,合法车辆需要准确接收娱乐、安全等信息,通过距离 BS 较近 SU 为距离 BS 较远的 PU 辅助传输信息,可以提高 PU 接收信号的质量,从而提高其传输可靠性。在 CR-NOMA-MSU-E 系统中,BS 发送复合信号到 N 个 SU,然后从 N 个 SU 中随机选择 1 个能成功解码复合信号的 SU,所选的 SU 将复合信号发送给 PU。在这个信号发送与接收的过程中,由于无线信号的广播特性,Eve 会对 PU 的信号进行窃听。在通信过程中,考虑各个信道之间的信道状态信息都已知。

在第 1 时隙中,BS 将包括发送给 PU 的信息 x_1 和发送给 SU 的信息 x_2 的复合信号发送到下行 NOMA 链路的 N 个 SU,该复合信号可以表示为 $\sqrt{\alpha_1 P}x_1 + \sqrt{\alpha_2 P}x_2$, α_1 和 α_2 分别为 x_1 和 x_2 的功率分

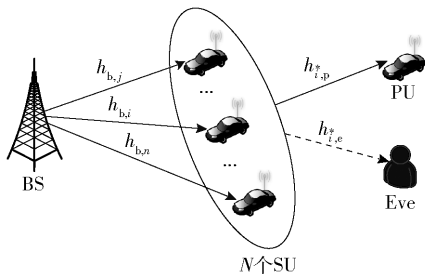


图1 基于 V2X 的 CR-NOMA-MSU-E 系统模型

配系数, 且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, $\alpha_1 > \alpha_2$, $E[|x_1|^2] = E[|x_2|^2] = 1$ 。假设所有节点均为单天线, 并以半双工模式运行, 任意两节点之间服从瑞利信道衰落, BS 的发射功率为 P , 加性高斯白噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise) 用均值为 0, 方差为 N_0 的复高斯变量表示。SU 接收到的信号可以表示为

$$\gamma_n = \sqrt{P}h_{b,n}(\sqrt{\alpha_1}x_1 + \sqrt{\alpha_2}x_2) + n_s \quad (1)$$

其中: $h_{b,n}$ 为 BS 与 SU 之间的信道增益; n_s 为 SU 的 AWGN。

N 个 SU 收到 BS 发送的复合信号后, 利用连续干扰删除 (SIC, successive interference cancellation) 技术先对 x_1 进行解码, 再解码自身的有用信号 x_2 。在 N 个 SU 中, 按照是否能成功解码消息 x_1 和 x_2 分为 2 组, 一组集合为 D , D 中的 SU 能够成功解码消息 x_1 和 x_2 ; 另一组集合为 \bar{D} , \bar{D} 中的 SU 不能成功解码消息 x_1 和 x_2 。

在第 2 时隙, 从 D 中随机选择 1 个 SU 将复合信号发送给 PU, 且其发射功率为 P_i , 则 PU 接收到选择的 SU 的信号^[14-15]为

$$\gamma_p = \sqrt{P_i}h_{i*,p}(\sqrt{\alpha_1}x_1 + \sqrt{\alpha_2}x_2) + n_p \quad (2)$$

其中: $h_{i*,p}$ 为选择的 SU 与 PU 之间的信道增益; n_p 为 PU 的 AWGN。

Eve 接收到的信号可以表示为

$$\gamma_e = \sqrt{P_i}h_{i*,e}(\sqrt{\alpha_1}x_1 + \sqrt{\alpha_2}x_2) + n_e \quad (3)$$

其中: $h_{i*,e}$ 为选择的 SU 与 Eve 之间的信道增益; n_e 为 Eve 的 AWGN。

第 1 时隙, SU 解码信号 x_1 和 x_2 的信干噪比 (SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio) 分别为

$$\gamma_s^{x_1} = \frac{\alpha_1 \rho |h_{b,n}|^2}{\alpha_2 \rho |h_{b,n}|^2 + 1} \quad (4)$$

$$\gamma_s^{x_2} = \alpha_2 \rho |h_{b,n}|^2 \quad (5)$$

其中: ρ 为 BS 的发射 SNR, $\rho = \frac{P}{N_0}$ 。

在第 2 时隙, PU 解码信号 x_1 的 SINR 为

$$\gamma_p^{x_1} = \frac{\alpha_1 \rho_i |h_{i*,p}|^2}{\alpha_2 \rho_i |h_{i*,p}|^2 + 1} \quad (6)$$

其中: ρ_i 为 SU 的发射 SNR, $\rho_i = \frac{P_i}{N_0}$ 。

Eve 解码信号 x_1 的 SINR 为

$$\gamma_e^{x_1} = \frac{\alpha_1 \rho_i |h_{i*,e}|^2}{\alpha_2 \rho_i |h_{i*,e}|^2 + 1} \quad (7)$$

通过分析, 得出不同时隙中各链路的 SINR, 在此基础上, 选择的 SU 与 PU 和 Eve 之间的互信息^[16]分别为

$$I_p = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_p^{x_1}) \quad (8)$$

$$I_e = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_e^{x_1}) \quad (9)$$

2 安全性能分析

根据式(8)和式(9), PU 的瞬时保密速率为

$$R_{\text{sec}} = [I_p - I_e]^+ \quad (10)$$

其中 $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

当 CR-NOMA-MSU-E 系统处于第 1 时隙, SU 未能成功解码 BS 发送的复合信号时, 即 $D = \emptyset$, PU 会产生中断; 当 CR-NOMA-MSU-E 系统处于第 2 时隙, 选择的 SU 到 PU 的瞬时保密容量 R_{sec} 小于 PU 的保密速率 R_{th} ($R_{\text{th}} \geq 0$) 时, PU 会产生中断。所以 CR-NOMA-MSU-E 系统中, PU 的 SOP 为

$$P^{\text{out}} = \Pr(D = \emptyset) + \underbrace{\Pr(D \neq \emptyset, R_{\text{sec}} < R_{\text{th}})}_A \quad (11)$$

在 SU 接收到 BS 发出的复合信号后, 采取 SIC 技术对 BS 发送的复合信号 x_1 和 x_2 解码, 根据 SIC 技术的规则, SU 先对信号 x_1 解码再对 x_2 解码。因此, SU 未能成功解码 BS 发送的复合信号的情况有 2 种: 第一种是 SU 解码 x_1 失败; 第二种是 SU 解码 x_1 成功而解码 x_2 失败。则

$$\Pr(D = \emptyset) =$$

$$\prod_{n=1}^N [\Pr(\gamma_s^{x_1} < \xi_p) + \Pr(\gamma_s^{x_1} > \xi_p, \gamma_s^{x_2} < \xi_s)] \quad (12)$$

其中: $\xi_p = 2^{2R_p} - 1$, $\xi_s = 2^{2R_s} - 1$, R_s 和 R_p 分别为 SU 和 PU 的目标传输速率。

假定各个链路的信道为瑞利衰落, 瑞利衰落条件下的概率密度函数 (PDF, probability density function)^[16]为

$$f_{|h|^2}(x) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (13)$$

其中 λ 为瑞利衰落因子。

将式(13)代入式(12),得

$$\Pr(D = \emptyset) = \prod_{n=1}^N \Pr\left(|h_{b,n}|^2 < \frac{\beta}{\rho}\right) = \prod_{n=1}^N \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta}{\rho\lambda_{b,n}}\right)\right] \quad (14)$$

其中: $\lambda_{b,n}$ 为 BS 与 SU 之间的瑞利衰落因子, $\beta =$

$$\max\left(\frac{\xi_p}{(\alpha_1 - \alpha_2\xi_p)}, \frac{\xi_s}{\alpha_2}\right).$$

设 D_k 和 \bar{D}_k 分别为 D 和 \bar{D} 的子集, 即 $D_k \subseteq D$, $\bar{D}_k \subseteq \bar{D}$. 当 SU 能成功解码 BS 发送的复合信号, 则 A 可表示为

$$A = \sum_{k=1}^N C_N^k \prod_{i \in D_k} \underbrace{\Pr(\gamma_s^{x_1} > \xi_p, \gamma_s^{x_2} > \xi_s)}_{B_1} \times \prod_{l \in \bar{D}_k} \underbrace{[1 - \Pr(\gamma_s^{x_1} > \xi_p, \gamma_s^{x_2} > \xi_s)]}_{B_2} \Pr(R_{\text{sec}} < R_{\text{th}}) \quad (15)$$

其中: i 表示成功解码复合信号的 SU, l 表示不能成功解码复合信号的 SU, $B_1 = \exp\left(-\frac{\beta}{\rho\lambda_{b,i}}\right)$, $B_2 = 1 - \exp\left(-\frac{\beta}{\rho\lambda_{b,l}}\right)$, $\lambda_{b,i}$ 和 $\lambda_{b,l}$ 分别为 BS 与 D_k 或 \bar{D}_k 中 SU 之间的瑞利衰落因子。

令 $X = \frac{\alpha_1 \rho_i |h_{i^*,p}|^2}{\alpha_2 \rho_i |h_{i^*,p}|^2 + 1}$, $Y = \frac{\alpha_1 \rho_i |h_{i^*,e}|^2}{\alpha_2 \rho_i |h_{i^*,e}|^2 + 1}$, $\delta = 2^{2R_{\text{th}}}$, 可以得到

$$\Pr(R_{\text{sec}} < R_{\text{th}}) = \Pr(X < \delta + \delta Y - 1) = \int_0^\infty F_X(\delta + \delta y - 1) f_Y(y) dy \quad (16)$$

其中, 随机过程 X 的累积分布函数和 Y 的 PDF 分别为

$$F_X(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{i^*,p}\rho_i(\alpha_1 - \alpha_2 x)}\right), x \leq \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (17)$$

$$f_Y(y) = \exp\left(-\frac{y}{\lambda_{i^*,e}\rho_i(\alpha_1 - \alpha_2 y)}\right) \times \left(\frac{\alpha_1}{\lambda_{i^*,e}\rho_i(\alpha_1 - \alpha_2 y)^2}\right), y \leq \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (18)$$

其中: $\lambda_{i^*,p}$ 为随机选择的 SU 与 PU 之间的瑞利衰落因子, $\lambda_{i^*,e}$ 为随机选择的 SU 与 Eve 之间的瑞利衰落因子。

将式(17)和式(18)代入式(16)得:

$$\Pr(R_{\text{sec}} < R_{\text{th}}) = \exp\left(-\frac{\omega}{\lambda_{i^*,e}\rho_i(\alpha_1 - \alpha_2 \omega)}\right) + \Delta \quad (19)$$

其中

$$\Delta = \int_0^\omega \left(1 - \exp\left\{-\frac{\delta + \delta y - 1}{\lambda_{i^*,p}\rho_i[\alpha_1 - \alpha_2(\delta + \delta y - 1)]}\right\}\right) \times f_Y(y) dy$$

可以利用高斯切比雪夫公式得到近似解。

根据式(11)~式(19), 可以得到 CR-NOMA-MSU-E 系统中 PU 的 SOP 的计算公式为

$$P_{\text{out}} = \prod_{n=1}^N \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta}{\rho\lambda_{b,n}}\right)\right] + \sum_{k=1}^N C_N^k \prod_{i \in D_k} \exp\left(-\frac{\beta}{\rho\lambda_{b,i}}\right) \prod_{l \in \bar{D}_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta}{\rho\lambda_{b,l}}\right)\right] \times \left[\exp\left(-\frac{\omega}{\lambda_{i^*,e}\rho_i(\alpha_1 - \alpha_2 \omega)}\right) + \Delta\right] \quad (20)$$

3 仿真结果与分析

基于瑞利衰落场景, 通过 Matlab 仿真平台, 对 CR-NOMA-MSU-E 车联网系统中 PU 的 SOP 进行分析和验证。考虑实际因素, 窃听信道条件较差, 所以, 仿真中设置 $\lambda_{b,n} = \lambda_{i^*,p} = 1$, $\lambda_{i^*,e} = 0.1$ 。此外, 如非特别说明, 仿真参数设置为: $R_s = 0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, $R_p = 0.1 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, $R_{\text{th}} = 0.1 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, $\alpha_1 = 0.8$, $\alpha_2 = 0.2$; 仿真次数为 10^6 , 每次生成 N 个 SU, 对应 N 条 BS-SU 链路, 每次只要至少有 1 个 SU 成功解码, 则选择其中 1 个成功解码的 SU 转发信号。

图 2 所示为 SU 数量 $N = 1, 2, 3$ 时, PU 的 SOP 随 SU 的发射 SNR, 即 ρ_i 的变化情况, 其中, BS 与 SU 的发射 SNR 关系为 $\rho = \rho_i + 5 \text{ dB}$ 。由图 2 可知, 理论分析的曲线与仿真结果完全匹配, 验证了公式推导的正确性。PU 的 SOP 随 ρ_i 的增大而降低, 随 N 的增大而降低。当同时改变 ρ_i 和 N 到某合适的区间时, PU 的 SOP 会迅速下降, 这说明增加 SU 发射 SNR 和 SU 数量确实可以提升系统的物理层安全性能。

图 3 所示为 SU 数量 $N = 1, 2, 3$ 时, PU 的 SOP 随保密速率 R_{th} 的变化情况, 其中, $\rho = 20 \text{ dB}$, $\rho_i = 15 \text{ dB}$ 。由图 3 可知, PU 的 SOP 会随 R_{th} 的增加而增加, 随 N 的增加而减小。当 $N = 3$ 时, PU 的 SOP 受到 R_{th} 的影响较大。这意味着当 N 达到一定数量时, 系统的安全性能受 R_{th} 的限制。所以, 在考虑提升系

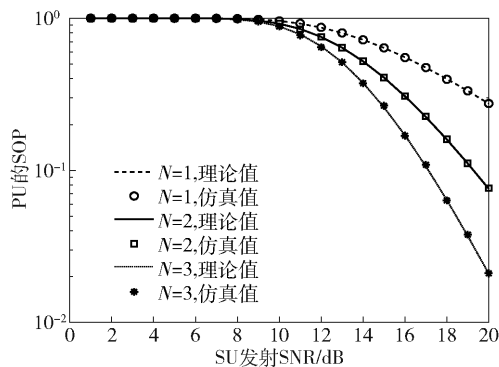


图2 不同SU数量 N 下,PU的SOP随SU发射SNR的变化

统安全性能时,需要综合考虑选取合适的SU数量和保密速率。

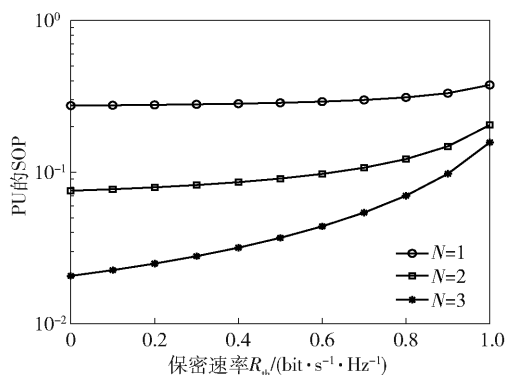


图3 不同SU数量 N 下,PU的SOP随保密速率 R_{th} 的变化

图4所示为不同SU发射SNR,即不同 ρ_i 下,PU的SOP随功率分配系数 α_1 的变化情况,其中,BS与SU的发射SNR关系为 $\rho = \rho_i + 5$ dB。由图4可知, N 一定时,PU的SOP随 ρ_i 的增加而降低,随 α_1 的增加而增加;且 ρ_i 越大,SOP随着 α_1 的变化越明显,这意味着系统的安全性能在不同功率分配系数下,会受到SU发射SNR的限制。

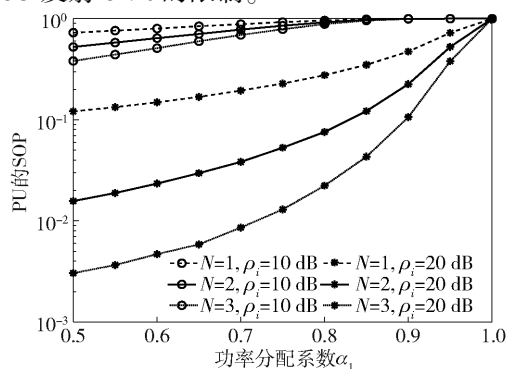


图4 不同 ρ_i 下,PU的SOP随功率分配系数 α_1 的变化

4 结束语

基于DF模式研究了CR-NOMA-MSU-E系统,推导出该系统中PU的SOP的计算公式。仿真结果表明,增加SU的发射SNR与SU数量能够有效地改善系统物理层安全性能,且SU数量越多,PU的SOP受到 R_{th} 的影响越大。所以,在考虑提升系统物理层安全性能时,要综合考虑选取合适的SU数量和保密速率;此外,研究还发现,CR-NOMA-MSU-E系统中PU的功率分配系数越大,系统安全性能越差。所提方案对SU的选择做了简化处理,只在 N 个SU中随机选择1个成功解码复合信号的SU进行转发,旨在初步验证PU安全性能受SU数量和发射SNR的影响情况,更优化的方案还应考虑SU的优化选择,所以在后续的研究中,将进一步通过复杂的数学问题分析不同最优SU选择方案下的PU的安全性能,从而衡量对于PU安全性而言,最优SU选择是否需要窃听链路信道条件。

参考文献:

- [1] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. V2X meets NOMA: non-orthogonal multiple access for 5G-enabled vehicular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(6): 14-21.
- [2] DO D, ANH L, NGUYEN T, et al. Joint impacts of imperfect CSI and imperfect SIC in cognitive radio-assisted NOMA-V2X communications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 128629-128645.
- [3] LV L, CHEN J, NI Q, et al. Cognitive non-orthogonal multiple access with cooperative relaying: a new wireless frontier for 5G spectrum sharing[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 188-195.
- [4] LV L, NI Q, DING Z G, et al. Application of non-orthogonal multiple access in cooperative spectrum-sharing networks over Nakagami- m fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 5506-5511.
- [5] LIU X, WANG Y J, LIU S, et al. Spectrum resource optimization for NOMA-based cognitive radio in 5G communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 24904-24911.
- [6] KUMAR A, KUMAR K. Relay sharing with DF and AF techniques in NOMA assisted cognitive radio networks[J]. Physical Communication, 2020, 42: 1-10.
- [7] SHANNON C E. Communication theory of secrecy sys-

- tems[J]. The Bell System Technical Journal, 1949, 28(4): 656-715.
- [8] WYNER A D. The wire-tap channel[J]. The Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1355-1367.
- [9] LI X W, HUANG M Y, LIU Y W, et al. I/Q imbalance aware nonlinear wireless-powered relaying of B5G networks: security and reliability analysis[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2020, 8(4): 1975-1987.
- [10] ZHOU F H, CHU Z, SUN H J, et al. Artificial noise aided secure cognitive beamforming for cooperative MISO-NOMA using SWIPT[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(4): 918-931.
- [11] XIANG Z W, YANG W W, PAN G F, et al. Physical layer security in cognitive radio inspired NOMA network[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2019, 13(3): 700-714.
- [12] NANDAN N, MAJHI S, WU H. Secure beamforming for MIMO-NOMA-based cognitive radio network[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(8): 1708-1711.
- [13] LI B, QI X H, HUANG K Z, et al. Security-reliability tradeoff analysis for cooperative NOMA in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 83-96.
- [14] LV L, CHEN J. Cooperative non-orthogonal multiple access in cognitive radio[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 2059-2062.
- [15] BHATTACHARJEE S. Friendly jamming assisted secure cooperative multicasting in cognitive radio-NOMA networks[C] // 2019 IEEE Globecom Workshops. Hawaii: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [16] LI M L, SELIM B, MUHAIDAT S, et al. Effects of residual hardware impairments on secure NOMA-based cooperative systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 2524-2536.