



研究与开发

NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全

丁一凡, 李光球, 李辉

(杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对未来海量用户设备接入的物理层安全 (physical layer security, PLS) 应用需求, 提出了一种组合非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA)、终端直通 (device-to-device, D2D) 与中继协作的 NOMA-D2D 协作无线系统 PLS 模型。该模型由采用发射天线选择 (transmit antenna selection, TAS) 的基站、分别作为基站和 D2D 发射端的 NOMA 远端蜂窝用户、D2D 接收端以及被动窃听者组成, 其中的 D2D 发射端承担基站的 NOMA 近端用户和解码转发中继两种角色。利用高斯-切比雪夫正交定理推导两种 TAS 方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的安全中断概率、非零安全容量概率以及渐近安全中断概率的近似表达式。数值计算和仿真实验验证了 NOMA-D2D 协作无线系统 PLS 性能分析的准确性; 在基站总功率恒定时增大分配给远端蜂窝用户的功率能有效提升 NOMA-D2D 协作无线系统的 PLS 性能。

关键词: 非正交多址接入; 终端直通; 发射天线选择; 物理层安全; 安全中断概率

中图分类号: TN918.1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022171

Physical layer security of NOMA-D2D cooperative wireless system

DING Yifan, LI Guangqiu, LI Hui

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

Abstract: Aiming at the physical layer security (PLS) application requirement of massive user equipments access in the future, the PLS model combining with non-orthogonal multiple access (NOMA), device-to-device (D2D) and relay cooperation was proposed. The model was composed of base station with transmit antenna selection (TAS), NOMA far cellular user of base station and D2D transmitter, D2D receiver and passive eavesdropper, the D2D transmitter was also assumed two roles of NOMA near user of base station and decode-and-forward relay. The approximate expressions for the secrecy outage probability, non-zero secrecy capacity probability and asymptotic secrecy outage probability of NOMA-D2D cooperative wireless system under two TAS schemes were derived by using Gaussian-Chebyshev Quadrature theorem. Numerical and simulation results verify the accuracy of PLS performance analysis of NOMA-D2D cooperative wireless system. The results also show that increasing the power allocated to far cellular user under constant total power of base station can effectively improve PLS performance of NOMA-D2D cooperative wireless system.

Key words: non-orthogonal multiple access, device-to-device, transmit antenna selection, physical layer security, secrecy outage probability



0 引言

终端直通 (device-to-device, D2D) 技术允许用户设备在基站的控制下实现彼此之间的直接通信, 有效地提高了蜂窝网络的频谱效率或吞吐量^[1-2]。文献[3]提出一种联合链路共享与功率分配算法, 在满足蜂窝用户服务质量的条件下最大化 D2D 无线系统的吞吐量。文献[4]通过多对 D2D 用户重用信道, 提出了一种两阶段资源分配算法来提升 D2D 无线系统的总容量。非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术利用串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 算法来避免同道干扰, 从而可以在相同的频带上同时为多个用户设备提供服务, 是另一种有效提升蜂窝网络频谱效率的技术^[5], 其与中继协作技术的结合可进一步提高蜂窝网络的频谱利用率。文献[6]推导了全双工中继辅助 NOMA 无线系统的中断概率和遍历容量闭合表达式。D2D 通信的异构功率利用特性与 NOMA 技术高度契合, 因此将 NOMA、D2D 与中继协作 3 种技术集成可进一步提高蜂窝网络的频谱效率^[7]。文献[8]推导了 NOMA-D2D 协作无线系统的各态历经容量闭合表达式。文献[9]通过联合两时隙功率分配来最大化 NOMA-D2D 协作无线系统的遍历和速率。文献[10]提出一种最优功率分配策略来最大化 NOMA-D2D 协作无线系统的遍历和速率。

然而, 无线传输固有的广播特性使得蜂窝用户、D2D 用户或 NOMA 用户的数据面临被窃听威胁, 物理层安全 (physical layer security, PLS) 可实现无线系统在信息论意义上的安全通信, 因此受到广泛的关注^[11-21]。文献[11]推导了采用发射天线选择 (transmit antenna selection, TAS) 技术的中继辅助 D2D 无线系统的安全中断概率 (secrecy outage probability, SOP) 和渐近 SOP 闭合表达式。

文献[12]推导了中继节点充当干扰器的 D2D 无线系统的 SOP、非零安全容量概率 (non-zero secrecy capacity probability, NZSCP) 和渐近 SOP 闭合表达式, 其中的被动窃听者采用选择合并和最大比合并 (maximal ratio combining, MRC) 方式实施窃听。文献[13]采用人工噪声干扰技术来提高 D2D 无线系统的 PLS 性能, 通过求解用户信号与人工噪声的最佳功率分配比来最大化系统的安全速率。文献[14]提出一种自适应协作干扰方案, 该方案通过优化干扰功率、模式切换标准等参数来最大化 D2D 无线系统的安全吞吐量。文献[15]推导了采用 TAS 技术的 NOMA 无线系统的 SOP 闭合表达式。文献[16]推导了采用半/全双工解码转发 (decode-and-forward, DF) NOMA 无线系统的 SOP 闭合表达式。文献[17]研究了近端用户充当全双工中继节点的 NOMA 协作无线系统的 PLS 性能, 考虑到全双工中继存在自干扰下推导出系统 SOP 闭合表达式。文献[18]研究了 Nakagami- m 衰落信道上多中继选择的 NOMA 协作无线系统的 PLS 性能, 并推导出 3 种最优中继选择方案下系统的 SOP 闭合表达式。文献[19]研究了窃听者空间位置随机分布的上行 NOMA 无线系统的 PLS 性能, 提出一种基于全双工基站干扰的安全传输方案来提高系统的安全吞吐量。文献[20-21]提出利用人工噪声干扰窃听者的方案, 该方案有效提升了中继节点被窃听场景下 NOMA-D2D 协作无线系统的 PLS 性能, 而基站和中继节点同时被窃听的应用场景尚需进一步研究。

现有关于 NOMA-D2D 协作无线系统的研究主要集中在如何获得高频谱效率, 然而, 当存在外部窃听者时, NOMA-D2D 协作无线系统中的用户数据面临安全隐患, 为此, 本文在文献[21]的基础上, 进一步考虑基站和中继节点同时被窃听的应用场景, 鉴于 TAS 技术可以增强无线系统的 PLS 性能, 提出一种采用 TAS 技术的 NOMA-D2D

协作无线系统 PLS 模型, 研究基站基于近端用户或远端蜂窝用户的 TAS 两种方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全, 并推导其 SOP、NZSCP 和渐近 SOP 近似表达式, 之后通过仿真实验加以验证。

1 系统模型

考虑采用 TAS 技术的 NOMA-D2D 协作无线系统 PLS 模型, 如图 1 所示。由一个基站 S、一对 D2D 用户 (即发射端 DT 和接收端 DR)、一个蜂窝用户 U 和一个被动窃听者 E 组成, 其中, DT 和 U 是 S 的一对 NOMA 近端和远端用户, DR 和 U 是 DT 的一对 NOMA 近端和远端用户; S 配备 M 根发射天线并采用 TAS 技术, DT、DR、U 以及 E 均只配备单根天线。

蜂窝网络允许 D2D 用户占用其频谱资源完成信息传输, 此外, DT 还充当 DF 中继节点来协助远端 U 进行信息安全传输。NOMA-D2D 协作无线系统的工作过程分两个时隙: 第一个时隙, S 采用 TAS 技术并以 NOMA 方式发送复合信号给 DT 和 U, 考虑 S 基于 DT 的 TAS (TAS-DT) 和基于 U 的 TAS (TAS-U) 两种方案, TAS-DT 侧重保证 DT 的信息安全传输, TAS-U 侧重保证 U 的信息安全传输, 而 E 被动窃听 S 发送给 DT 和 U 的机密信息^[15]; 第二个时隙, D2D 发射端 DT 作为 DF 中继节点, 工作在半双工模式, 以 NOMA 方式发送复合信号给 DR 和 U, 此时 E 被动窃听 DT 发送给 DR 和 U 的机密信息, 且 S 和 DT 无法获得窃听链路的信道状态信息; E 将两个时隙中窃听到的 U 信息以 MRC 方式进行合并。

假定条件如下。

(1) DT、DR 及 E 均具备完美 SIC 技术, 而 U 不具备 SIC 技术。

(2) 第一个时隙中 S 的第 i 根发射天线与 DT 和 U 的链路系数分别为 $h_{\text{SDT},i}$ 和 $h_{\text{SU},i}$, 第二个时隙

DT→DR、DT→U 的链路系数分别为 h_{DTR} 和 h_{DTU} ; S→E、DT→E 的窃听链路系数分别为 h_{SE} 和 h_{DE} ; 上述所有链路系数均服从独立复高斯分布 $\mathcal{CN}(0,1)$ 。

(3) S→DT、S→U、DT→DR 及 DT→U 链路均具有完美信道状态信息。

(4) S→DT、S→U 链路上的加性白高斯噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 均服从 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 分布; DT→DR、DT→U 链路上的 AWGN 均服从 $\mathcal{CN}(0, N'_0)$ 分布; S→E 链路上的 AWGN 服从 $\mathcal{CN}(0, N_E)$ 分布; DT→E 链路上的 AWGN 服从 $\mathcal{CN}(0, N'_E)$ 分布。

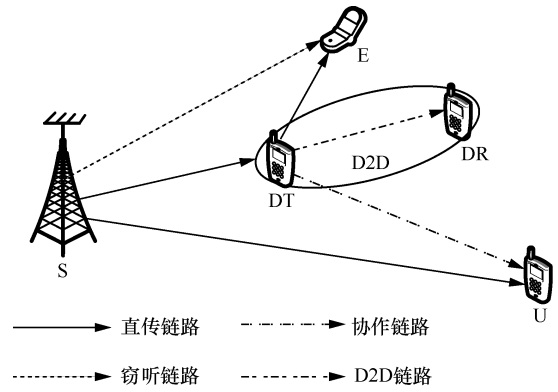


图 1 NOMA-D2D 协作无线系统 PLS 模型

2 传输过程

2.1 主信道

在第一个时隙中, S 的第 i 根发射天线发送复合信号 $\sqrt{a_1 P_s} x_1 + \sqrt{a_2 P_s} x_2$ 至 DT 和 U, 其中, P_s 为 S 的发射功率, a_1 和 a_2 为 S 发送至 DT 和 U 的功率分配因子, 且 $a_1 < a_2$, $a_1 + a_2 = 1$, x_1 和 x_2 为 S 发送给 DT 和 U 的信号。同时 S 采用 TAS-DT 和 TAS-U 两种发射天线选择方案, 下面对这两种方案进行分析。

2.1.1 TAS-DT

S 基于 DT 进行发射天线选择, 即选取使 S→DT 链路具有最大瞬时信干噪比 (signal to interference-noise ratio, SINR) 的天线发射信号。



DT 解码时先将 x_1 当作干扰, 解码得到 x_2 , 然后利用 SIC 技术去除 x_2 的影响, 再解码得到 S 发给自己的信号 x_1 , 因此 DT 解码得到 x_2 和 x_1 的最大瞬时 SINR 为:

$$\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}) = \frac{a_2 \bar{\gamma}_S |h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}|^2}{a_1 \bar{\gamma}_S |h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}|^2 + 1} \quad (1)$$

$$\gamma_1(a_1, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}) = a_1 \bar{\gamma}_S |h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}|^2 \quad (2)$$

其中, $|h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}|^2 = \max_{i \in \{1, \dots, M\}} \{|h_{\text{SDT},i}|^2\}$, $\bar{\gamma}_S = \frac{P_S}{N_0}$ 表示

直传链路的平均信噪比。S 基于 DT 进行 TAS 时, U 相当于随机选取发射天线, U 解码时会将 x_1 当作干扰, 直接解码 S 发给自己的信号 x_2 , 因此 TAS-DT 下 U 解码得到 x_2 的瞬时 SINR 为 $\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SU}})$ 。

2.1.2 TAS-U

S 基于 U 进行发射天线选择, 即选取使 $S \rightarrow U$ 链路具有最大瞬时 SINR 的天线发射信号, 此时 U 解码出 x_2 的最大瞬时 SINR 为 $\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SU}}^{\text{TAS-U}})$ 。其中, $|h_{\text{SU}}^{\text{TAS-U}}|^2 = \max_{i \in \{1, \dots, M\}} \{|h_{\text{SU},i}|^2\}$ 。S 基于 U 进行 TAS 时, DT 则随机选取发射天线, 因此 TAS-U 下 DT 解码出 x_2 和 x_1 的瞬时 SINR 为 $\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SDT}})$ 和 $\gamma_1(a_1, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SDT}})$ 。

在第二个时隙中, DT 作为中继节点以 NOMA 方式将复合信号 $\sqrt{b_1 P_{\text{DT}}} x_3 + \sqrt{b_2 P_{\text{DT}}} x_2$ 发送至 DR 和 U, 其中, P_{DT} 为 DT 的发射功率, b_1 和 b_2 为 DT 发送至 DR 和 U 的功率分配因子, 且 $b_1 < b_2$, $b_1 + b_2 = 1$, x_3 和 x_2 为 DT 发送给 DR 和 U 的信号。由于 DR 具有 SIC 技术, 并利用其去除 x_2 对自己的干扰, 因此 DR 解码得到 x_3 的瞬时 SINR 为 $\gamma_1(b_1, \bar{\gamma}_{\text{DT}}, h_{\text{DTR}})$ 。其中, $\bar{\gamma}_{\text{DT}} = \frac{P_{\text{DT}}}{N'_0}$ 表示 DT→DR 或 DT→U 链路的平均信噪比。U 在第二时隙中将 x_3 当作干扰, 直接解码得到 DT 发给自己的信号 x_2 , 此时 U 解码出 x_2 的瞬时 SINR 为 $\gamma_2(b_1, b_2, \bar{\gamma}_{\text{DT}}, h_{\text{DTU}})$ 。

2.2 窃听信道

虽然 S 采用 TAS 技术, 但 E 随机选取天线在两个时隙中进行窃听, 则 E 在第一个时隙窃听复合信号 $\sqrt{a_1 P_S} x_1 + \sqrt{a_2 P_S} x_2$, 第二个时隙窃听复合信号 $\sqrt{b_1 P_{\text{DT}}} x_3 + \sqrt{b_2 P_{\text{DT}}} x_2$ 。E 在第一个时隙中窃听 x_2 时将 x_1 当作干扰, 窃听 x_1 时利用 SIC 技术去除 x_2 的影响, 此时 E 窃听 x_2 和 x_1 时的瞬时 SINR 分别为 $\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_E, h_{\text{SE}})$ 和 $\gamma_1(a_1, \bar{\gamma}_E, h_{\text{SE}})$ 。其中, $\bar{\gamma}_E$ 表示窃听链路的平均信噪比。E 在第二个时隙中窃听 x_2 时会将 x_3 当作干扰, 然后利用 SIC 去除 x_2 再窃听 x_3 , 此时 E 窃听 x_2 和 x_3 的瞬时 SINR 分别为 $\gamma_2(b_1, b_2, \bar{\gamma}_E, h_{\text{DTE}})$ 和 $\gamma_1(b_1, \bar{\gamma}_E, h_{\text{DTE}})$ 。

E 将两个时隙中接收的 x_2 信号进行最大比合并, 以对 U 实施窃听, 那么 E 窃听 x_2 的瞬时 SINR 为 $\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_E, h_{\text{SE}}) + \gamma_2(b_1, b_2, \bar{\gamma}_E, h_{\text{DTE}})$ 。

3 安全性能分析

在图 1 所示的 NOMA-D2D 协作无线系统中, DT 和 DR 的安全容量 (即 C_1 和 C_3) 分别表示为 $\frac{1}{2} \left[\log \frac{1 + \gamma_1(a_1, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SDT},i})}{1 + \gamma_1(a_1, \bar{\gamma}_E, h_{\text{SE}})} \right]^+$ 和 $\frac{1}{2} \left[\log \frac{1 + \gamma_1(b_1, \bar{\gamma}_{\text{DT}}, h_{\text{DTR}})}{1 + \gamma_1(b_1, \bar{\gamma}_E, h_{\text{DTE}})} \right]^+$ 其中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。由于 DT 采用 DF 协议, 因此 U 的信道容量将受限于 $S \rightarrow \text{DT}$ 链路及 $S \rightarrow U$ 、 $\text{DT} \rightarrow U$ 联合链路的较小信道容量, 于是 DF 协议下 U 的安全容量 (即 C_2) 可表示为 $\frac{1}{2} \left[\log \frac{X}{Y} \right]^+$ 。

其中, $X = 1 + \min(\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SDT},i}), \gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_S, h_{\text{SU},i}) + \gamma_2(b_1, b_2, \bar{\gamma}_{\text{DT}}, h_{\text{DTU}})$, $Y = 1 + \gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_E, h_{\text{SE}}) + \gamma_2(b_1, b_2, \bar{\gamma}_E, h_{\text{DTE}})$ 。

3.1 安全中断概率

图 1 所示的 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 可定义为 DT、U 和 DR 的安全容量至少有一个小于其传输的目标安全速率 R_m 的概率, $m \in \{1, 2, 3\}$, 即:

$$P = \Pr(C_1 < R_1 \text{ 或 } C_2 < R_2 \text{ 或 } C_3 < R_3) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3) \quad (3)$$

其中, $P_1 = \Pr(C_1 < R_1)$ 、 $P_2 = \Pr(C_2 < R_2)$ 和 $P_3 = \Pr(C_3 < R_3)$ 分别为 DT、U 和 DR 的 SOP。令 $\theta_m = 2^{2R_m}$, 下面对 TAS-DT 和 TAS-U 两种方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 进行推导。

3.1.1 TAS-DT

DT 的 SOP 可表示为^[15]:

$$P_1^{\text{TAS-DT}} = \int_0^\infty F_{1,1}^1(\theta_1 - 1 + \theta_1 x) f_{E1}^1(x) dx \quad (4)$$

其中, $F_{1,1}^1(\cdot)$ 表示 $\gamma_1(a_1, \bar{\gamma}_s, h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}})$ 的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF), $f_{E1}^1(\cdot)$ 表示 $\gamma_1(a_1, \bar{\gamma}_e, h_{\text{SE}})$ 的概率密度函数 (probability density function, PDF)。

由于 $h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}$ 和 h_{SE} 均服从 $\mathcal{CN}(0,1)$ 分布, 同时利用文献[22]中的式(3.381.4), 可推得 DT 的 SOP 表达式为:

$$P_1^{\text{TAS-DT}} = 1 - \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} \frac{(-1)^{i+1} \bar{\gamma}_s}{i \theta_1 \bar{\gamma}_e + \bar{\gamma}_s} \exp\left(-\frac{i(\theta_1 - 1)}{a_1 \bar{\gamma}_s}\right) \quad (5)$$

U 的 SOP 可表示为:

$$P_2^{\text{TAS-DT}} = \Pr\left(\frac{X}{Y} < \theta_2\right) = \int_0^\infty F_X(\theta_2 x) f_Y(x) dx \quad (6)$$

其中, $F_X(\cdot)$ 表示 X 的 CDF, $f_Y(\cdot)$ 表示 Y 的 PDF。基于文献[16]中的假定, $\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_s, h_{\text{SU}}) + \gamma_2(b_1, b_2, \bar{\gamma}_{\text{DT}}, h_{\text{DTU}})$ 通常大于 $\gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_s, h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}})$, 因此 X 可近似为 $X = 1 + \gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_s, h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}})$ 。由于 $h_{\text{SDT}}^{\text{TAS-DT}}$ 服从 $\mathcal{CN}(0,1)$ 分布, 可推得 X 的 CDF 为:

$$F_X(x) = \begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} (-1)^{i+1} \exp\left(-\frac{i(x-1)}{\bar{\gamma}_s(1-a_1x)}\right), & 1 \leq x \leq \frac{1}{a_1} \\ 1, & x > \frac{1}{a_1} \end{cases} \quad (7)$$

令 $Y = Y_1 + Y_2$, $Y_1 = 1 + \gamma_2(a_1, a_2, \bar{\gamma}_e, h_{\text{SE}})$, $Y_2 = \gamma_2(b_1, b_2, \bar{\gamma}_e, h_{\text{DTE}})$, 由于 h_{SE} 和 h_{DTE} 服从 $\mathcal{CN}(0,1)$ 分布, 且 Y_1 和 Y_2 相互独立, 故 Y 的 PDF 为 Y_1 的 PDF 与 Y_2 的 PDF 的卷积^[16], 则有:

$$f_Y(x) = \begin{cases} \frac{a_2 b_2}{\bar{\gamma}_e^2} \int_1^x \Psi(\tau, x) d\tau, & 1 < x \leq 1/a_1 \\ \frac{a_2 b_2}{\bar{\gamma}_e^2} \int_{x-a_2/a_1}^{1/a_1} \Psi(\tau, x) d\tau, & \frac{1}{a_1} < x \leq \frac{1+a_2}{a_1} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中, } \Psi(\tau, x) = \frac{1}{(1-a_1\tau)^2 (b_2 - b_1(x-\tau))^2} \cdot$$

$$\exp\left(-\frac{\tau-1}{\bar{\gamma}_e(1-a_1\tau)} - \frac{x-\tau}{\bar{\gamma}_e(b_2-b_1)(x-\tau)}\right)。$$

虽然难以获得 Y 的 PDF 精确表达式, 但利用高斯—切比雪夫正交定理^[22], 可推得 Y 的近似 PDF 为:

$$f_Y(x) \approx \begin{cases} \frac{(x-1)\pi a_2 b_2}{2N\bar{\gamma}_e^2} \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\phi_n^2} \Psi(x_n, x), & 1 < x \leq \frac{1}{a_1} \\ \frac{(1+a_2-a_1x)\pi a_2 b_2}{2Na_1\bar{\gamma}_e^2} \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\phi_n^2} \Psi(y_n, x), & \frac{1}{a_1} < x \leq \frac{1+a_2}{a_1} \end{cases} \quad (9)$$

其中, N 表示高斯—切比雪夫式中权衡复杂度和精确度的展开式项数, $\phi_n = \cos\left(\frac{(2n-1)\pi}{2N}\right)$,

$$x_n = \frac{x+1}{2} + \frac{x-1}{2} \phi_n, \quad y_n = \frac{x+1}{2} + \frac{1+a_2-a_1x}{2a_1} \phi_n。$$

由于 X 和 Y 相互独立, 令 $\xi_1 = \frac{1+\theta_2 a_1}{2\theta_2 a_1} + \frac{1-\theta_2 a_1}{2\theta_2 a_1} \phi_m$, 再次利用高斯—切比雪夫

正交定理, 可推得 U 的 SOP 近似表达式为:

$$P_2^{\text{TAS-DT}} \approx 1 - \frac{(1-\theta_2 a_1)\pi^2 a_2 b_2}{4\theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_e^2} \sum_{m=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N \binom{M}{i} (-1)^{i+1} \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} (\xi_1 - 1) \Psi(x_n, \xi_1) \exp\left(-\frac{i(\theta_2 \xi_1 - 1)}{\bar{\gamma}_s(1-a_1\theta_2 \xi_1)}\right) \quad (10)$$

DR 的 SOP 可表示为:

$$P_3 = \Pr\left(\frac{1 + (\gamma_1 b_1, \bar{\gamma}_{\text{DT}}, h_{\text{DIDR}})}{1 + \gamma_1(b_1, \bar{\gamma}_e, h_{\text{DTE}})} < \theta_3\right) \quad (11)$$

与式(5)的推导类似, 可推得 DR 的 SOP



表达式为:

$$P_3 = 1 - \frac{\bar{\gamma}_{DT}}{\theta_3 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{DT}} \exp\left(-\frac{\theta_3 - 1}{b_1 \bar{\gamma}_{DT}}\right) \quad (12)$$

需特别注意的是, DR 相较于 DT 可以看作单输入单输出 NOMA 无线系统中的近端用户设备, 式 (12) 与文献[15]中式 (10) 一样, 故文献[15]的结果为本文的特殊情况。

将式 (5)、式 (10) 和式 (12) 代入式 (3) 中, 可得 TAS-DT 方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 近似表达式为:

$$P^{\text{TAS-DT}} = 1 - \frac{(1 - \theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2 \bar{\gamma}_{DT} \bar{\gamma}_S}{4 \theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2 (\theta_3 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{DT})} \exp\left(-\frac{\theta_3 - 1}{b_1 \bar{\gamma}_{DT}}\right) \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \binom{M}{i} \binom{M}{j} \frac{(-1)^{i+j} (\xi_1 - 1)}{i \theta_1 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_S} \cdot \sqrt{1 - \phi_m^2} \sqrt{1 - \phi_n^2} \Psi(x_n, \xi_1) \exp\left(-\frac{i(\theta_1 - 1)}{a_1 \bar{\gamma}_S} - \frac{j(\theta_2 \xi_1 - 1)}{\bar{\gamma}_S (1 - a_1 \theta_2 \xi_1)}\right) \quad (13)$$

3.1.2 TAS-U

TAS-U 方案下, DT 和 U 的 SOP 类似式 (5) 和式 (10) 的推导, 则 DT 和 U 的 SOP 表达式分别为:

$$P_1^{\text{TAS-U}} = 1 - \frac{\bar{\gamma}_S}{\theta_1 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_S} \exp\left(-\frac{\theta_1 - 1}{a_1 \bar{\gamma}_S}\right) \quad (15)$$

$$P_2^{\text{TAS-U}} = 1 - \frac{(1 - \theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2}{4 \theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{1 - \phi_m^2} \sqrt{1 - \phi_n^2} (\xi_1 - 1) \Psi(x_n, \xi_1) \exp\left(-\frac{\theta_2 \xi_1 - 1}{\bar{\gamma}_S (1 - a_1 \theta_2 \xi_1)}\right) \quad (16)$$

DR 只接收来自 DT 发射的信号, 故两种方案下 SOP 一样, 因此 TAS-U 方案下, 将式 (14)、式 (15) 和式 (12) 代入式 (3) 中, 可得 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 近似表达式为:

$$P^{\text{TAS-U}} = 1 - \frac{(1 - \theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2 \bar{\gamma}_{DT} \bar{\gamma}_S}{4 \theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2 (\theta_3 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{DT})} \exp\left(-\frac{\theta_3 - 1}{b_1 \bar{\gamma}_{DT}}\right) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{\xi_1 - 1}{\theta_1 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_S} \cdot \sqrt{1 - \phi_m^2} \sqrt{1 - \phi_n^2} \Psi(x_n, \xi_1) \exp\left(-\frac{\theta_1 - 1}{a_1 \bar{\gamma}_S} - \frac{\theta_2 \xi_1 - 1}{\bar{\gamma}_S (1 - a_1 \theta_2 \xi_1)}\right) \quad (16)$$

由式 (13) 和式 (16) 可得定理 1。

定理 1 图 1 的 NOMA-D2D 协作无线系统在 TAS-DT 和 TAS-U 方案下的安全中断概率均与直传链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_S$ 、基站 S 和中继 DT 的功率分配系数 a_1 、 b_1 以及用户 DT、U 和 DR 的目标安全速率 R_1 、 R_2 和 R_3 等参数有关。

3.2 非零安全容量概率

图 1 所示的 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 可定义为用户 DT、U 和 DR 的安全容量均大于零的概率。令 P_1^{non} 、 P_2^{non} 和 P_3^{non} 分别为用户 DT、U 和 DR 的 NZSCP, 则 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 表示为:

$$P^{\text{non}} = \Pr(C_1 > 0 \text{ 且 } C_2 > 0 \text{ 且 } C_3 > 0) = P_1^{\text{non}} P_2^{\text{non}} P_3^{\text{non}} \quad (17)$$

下面对两种方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 进行推导。

3.2.1 TAS-DT

DT 的 NZSCP 可表示为^[15]:

$$P_1^{\text{non, TAS-DT}} = \int_0^\infty (1 - F_{l,1}^1(x)) f_{E1}^1(x) dx \quad (18)$$

利用文献[22]中的式 (3.381.4), 可推得 DT 的 NZSCP 表达式为:

$$P_1^{\text{non, TAS-DT}} = \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} \frac{(-1)^{i+1}}{a_1 \bar{\gamma}_E} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{ix}{a_1 \bar{\gamma}_S} - \frac{x}{a_1 \bar{\gamma}_E}\right) dx = \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} \frac{(-1)^{i+1} \bar{\gamma}_S}{i \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_S} \quad (19)$$

U 的 NZSCP 可表示为:

$$P_2^{\text{non, TAS-DT}} = \int_0^\infty (1 - F_X(x)) f_Y(x) dx \quad (20)$$

将式 (7) 和式 (9) 代入式 (20) 中, 令 $\xi_2 = \frac{1+a_1}{2a_1} + \frac{a_2}{2a_1}\phi_m$, 可推得 U 的 NZSCP 近似表达式为:

$$P_2^{\text{non}, \text{TAS-DT}} \approx \frac{\pi^2 a_2^2 b_2}{4a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2} \sum_{m=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N \binom{M}{i} (-1)^{i+1} \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} (\xi_2 - 1) \Psi(x_n, \xi_2) \exp\left(-\frac{i(\xi_2 - 1)}{\bar{\gamma}_S(1-a_1\xi_2)}\right) \quad (21)$$

DR 的 NZSCP 可表示为:

$$P_3^{\text{non}} = \Pr\left(\frac{1+\gamma_1(b_1, \bar{\gamma}_{\text{DT}}, h_{\text{DTDR}})}{1+\gamma_1(b_1, \bar{\gamma}_E, h_{\text{DTE}})} > 1\right) \quad (22)$$

采用与式 (19) 相似的推导, 可推得 DR 的 NZSCP 表达式为:

$$P_3^{\text{non}} = \frac{1}{b_1 \bar{\gamma}_E} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{x}{b_1 \bar{\gamma}_{\text{DT}}} - \frac{x}{b_1 \bar{\gamma}_E}\right) dx = \frac{\bar{\gamma}_{\text{DT}}}{\bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{\text{DT}}} \quad (23)$$

将式 (19)、式 (21) 和式 (23) 代入式 (17) 中, 可推得 TAS-DT 方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 近似表达式为:

$$P^{\text{non}, \text{TAS-DT}} = \frac{\pi^2 a_2^2 b_2 \bar{\gamma}_{\text{DT}} \bar{\gamma}_S}{4a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2 (\bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{\text{DT}})} \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \binom{M}{i} \binom{M}{j} \frac{(-1)^{i+j} (\xi_2 - 1)}{i \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_S} \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} \Psi(x_n, \xi_2) \exp\left(-\frac{j(\xi_2 - 1)}{\bar{\gamma}_S(1-a_1\xi_2)}\right) \quad (24)$$

3.2.2 TAS-U

TAS-U 方案下, DT 和 U 的 NZSCP 类似式 (19) 和式 (21) 的推导, 则 DT 和 U 的 NZSCP 表达式分别为:

$$P_1^{\text{non}, \text{TAS-U}} = \frac{\bar{\gamma}_S}{\bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_S} \quad (25)$$

$$P_2^{\text{non}, \text{TAS-U}} \approx \frac{\pi^2 a_2^2 b_2}{4a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} (\xi_2 - 1) \Psi(x_n, \xi_2) \exp\left(-\frac{\xi_2 - 1}{\bar{\gamma}_S(1-a_1\xi_2)}\right) \quad (26)$$

此方案下, 将式 (25)、式 (26) 和式 (23) 代入式 (17) 中, 可推得 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 近似表达式为:

$$P^{\text{non}, \text{TAS-U}} = \frac{\pi^2 a_2^2 b_2 \bar{\gamma}_{\text{DT}} \bar{\gamma}_S}{4a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2 (\bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{\text{DT}})} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{\xi_2 - 1}{\bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_S} \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} \Psi(x_n, \xi_2) \exp\left(-\frac{\xi_2 - 1}{\bar{\gamma}_S(1-a_1\xi_2)}\right) \quad (27)$$

由式 (24) 和式 (27) 可得到定理 2。

定理 2 图 1 的 NOMA-D2D 协作无线系统在 TAS-DT 和 TAS-U 方案下的非零安全容量概率均与直传链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_S$ 、协作链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_{\text{DT}}$ 、基站 S 和中继 DT 的功率分配系数 a_1 、 b_1 等参数有关。

若 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 越高, 窃听者 E 就越难窃听到用户 DT、U 和 DR 的机密信息, 其物理层安全性能越好。

3.3 渐近安全中断概率

为了更直观地了解高 $\bar{\gamma}_S$ 下 NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全性能, 接下来将研究 $\bar{\gamma}_S \rightarrow \infty$ 时 NOMA-D2D 协作无线系统的渐近安全中断概率^[18]:

$$P^\infty = (G_a \bar{\gamma}_S)^{-G_d} + o(\bar{\gamma}_S^{-G_d}) \quad (28)$$

其中, G_d 表示安全分集增益, 反映了 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 随 $\bar{\gamma}_S$ 变化的快慢; G_a 表示安全阵列增益; $o(\cdot)$ 表示高阶无穷小项。

3.3.1 TAS-DT

对于 DT, 将其 CDF 的指数部分进行麦克劳林级数展开, 仅保留展开式的前两项, 于是 DT 的渐近 CDF 表示为:

$$F_{1,1}^{1,\infty}(x) = \left(\frac{x}{a_1 \bar{\gamma}_S}\right)^M \quad (29)$$

利用文献[22]中的式 (3.381.4), 可推得 DT 的渐近 SOP 表达式为:



$$P_1^{\infty, \text{TAS-DT}} = \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} \frac{\theta_1^i (\theta_1 - 1)^{M-i} i! \bar{\gamma}_E^i}{a_1^{M-i} \bar{\gamma}_S^M} \quad (30)$$

对于 U, 当 $\bar{\gamma}_S \rightarrow \infty$ 时, 可得式 (7) 的渐近 CDF 为:

$$F_X^\infty(x) = \begin{cases} \frac{(x-1)^M}{(\bar{\gamma}_S(1-a_1x))^M}, & 1 \leq x \leq \frac{1}{a_1} \\ 1, & x > \frac{1}{a_1} \end{cases} \quad (31)$$

令 $\xi_3 = \frac{1+\theta_2 a_1}{2\theta_2 a_1} + \frac{1-\theta_2 a_1}{2\theta_2 a_1} \phi_m$, 将式 (31) 和式 (9)

代入式 (6) 中, 可推得 U 的渐近 SOP 表达式为:

$$P_2^{\infty, \text{TAS-DT}} \approx \frac{(1-\theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2}{4\theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} (\xi_3 - 1) \Psi(x_n, \xi_3) \left(\frac{(\theta_2 \xi_3 - 1)^M}{(1-a_1 \theta_2 \xi_3)^M \bar{\gamma}_S^M} - 1 \right) + 1 \quad (32)$$

其中, DT 和 U 的安全阵列增益表达式分别为:

$$G_a^{\text{DT, TAS-DT}} = \left\{ \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} \frac{\theta_1^i (\theta_1 - 1)^{M-i} i! \bar{\gamma}_E^i}{a_1^{M-i}} \right\}^{-\frac{1}{M}} \quad (33)$$

$$G_a^{\text{U, TAS-DT}} = \left\{ \frac{(1-\theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2}{4\theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{(\theta_2 \xi_3 - 1)^M (\xi_3 - 1)}{(1-a_1 \theta_2 \xi_3)^M} \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} \Psi(x_n, \xi_3) \right\}^{-\frac{1}{M}} \quad (34)$$

将式 (30)、式 (32) 和式 (12) 代入式 (3) 中, 可得 NOMA-D2D 协作无线系统的渐近 SOP 为:

$$P^{\infty, \text{TAS-DT}} = 1 - \frac{(1-\theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2 \bar{\gamma}_{\text{DT}}}{4\theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2 (\theta_3 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{\text{DT}})} \exp \left(-\frac{\theta_3 - 1}{b_1 \bar{\gamma}_{\text{DT}}} \right) \left(\sum_{i=0}^M \binom{M}{i} \frac{\theta_1^i (\theta_1 - 1)^{M-i} i! \bar{\gamma}_E^i}{a_1^{M-i} \bar{\gamma}_S^M} - 1 \right) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} (\xi_3 - 1) \Psi(x_n, \xi_3) \left(\frac{(\theta_2 \xi_3 - 1)^M}{(1-a_1 \theta_2 \xi_3)^M \bar{\gamma}_S^M} - 1 \right) \quad (35)$$

3.3.2 TAS-U

TAS-U 方案下 DT 和 U 的渐近 SOP 表达式为:

$$P_1^{\infty, \text{TAS-U}} = \frac{\theta_1 - 1 + \theta_1 a_1 \bar{\gamma}_E}{a_1 \bar{\gamma}_S} \quad (36)$$

$$P_2^{\infty, \text{TAS-U}} \approx \frac{(1-\theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2}{4\theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} (\xi_3 - 1) \Psi(x_n, \xi_3) \left(\frac{\theta_2 \xi_3 - 1}{(1-a_1 \theta_2 \xi_3) \bar{\gamma}_S} - 1 \right) + 1 \quad (37)$$

此方案下 DT 和 U 的安全阵列增益表达式分别为:

$$G_a^{\text{DT, TAS-U}} = \frac{a_1}{\theta_1 - 1 + \theta_1 a_1 \bar{\gamma}_E} \quad (38)$$

$$G_a^{\text{U, TAS-U}} = \left\{ \frac{(1-\theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2}{4\theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{(\theta_2 \xi_3 - 1)(\xi_3 - 1)}{1-a_1 \theta_2 \xi_3} \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} \Psi(x_n, \xi_3) \right\}^{-1} \quad (39)$$

将式 (36)、式 (37) 和式 (12) 代入式 (3) 中, 可得 TAS-U 方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的渐近 SOP 表达式为:

$$P^{\infty, \text{TAS-U}} = 1 - \frac{(1-\theta_2 a_1) \pi^2 a_2 b_2 \bar{\gamma}_{\text{DT}}}{4\theta_2 a_1 N^2 \bar{\gamma}_E^2 (\theta_3 \bar{\gamma}_E + \bar{\gamma}_{\text{DT}})} \left(\frac{\theta_1 - 1 + \theta_1 a_1 \bar{\gamma}_E}{a_1 \bar{\gamma}_S} - 1 \right) \exp \left(-\frac{\theta_3 - 1}{b_1 \bar{\gamma}_{\text{DT}}} \right) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\phi_m^2} \sqrt{1-\phi_n^2} (\xi_3 - 1) \Psi(x_n, \xi_3) \left(\frac{\theta_2 \xi_3 - 1}{(1-a_1 \theta_2 \xi_3) \bar{\gamma}_S} - 1 \right) \quad (40)$$

由式 (30)、式 (32)、式 (35)、式 (36)、式 (37) 和式 (40) 可得到定理 3。

定理 3 针对图 1 的 NOMA-D2D 协作无线系统, 可得出如下结论。

(1) TAS-DT 方案下 DT 和 U 的安全分集增益均是 M , 而 TAS-U 方案下 DT 和 U 的安全分集增益均是 1。

(2) 直传链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_S$ 、协作链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_{\text{DT}}$ 、基站 S 和中继 DT 的功率分配系数 a_1 、 b_1 等参数可通过改变安全阵列增益来影响 NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全性能。

(3) $\bar{\gamma}_S \rightarrow \infty$ 对 DR 的渐近安全中断概率没有影响。

4 数值计算与仿真

下面利用 MATLAB 对 NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全性能指标进行数值计算和仿真, 研究发射天线数 M 、直传链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_s$ 、 S 和 DT 的功率分配系数 a_1 、 b_1 等参数对 NOMA-D2D 协作无线系统 PLS 性能的影响。由于在实际情况中, 中继节点 DT 的发射功率通常小于基站 S , 基于文献[21]假定直传链路和协作链路上 AWGN 的方差一样, 取 $\bar{\gamma}_{DT} = \bar{\gamma}_s/2$ 。NOMA-D2D 协作无线系统的仿真参数见表 1, 用户 DT、U 和 DR 的 SOP 如图 2 所示, 不同 $\bar{\gamma}_e$ 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 如图 3 所示, 不同 b_1 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 如图 4 所示, 不同 R_m 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 如图 5 所示, 用户 DT、U 和 DR 的 NZSCP 如图 6 所示, 不同 M 和 $\bar{\gamma}_e$ 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 如图 7 所示。若无特殊说明, 采用表 1 的参数设置^[21], 结果如图 2~图 7 所示。

图 2 给出了用户 DT、U 和 DR 的 SOP 性能曲线, 可得以下结论。

(1) 两种方案下 DT、DR 以及 U 的 SOP 均随着 $\bar{\gamma}_s$ 的增加而降低, 其 PLS 性能得到提升。在其他参数相同的情况下, DT 和 DR 的 PLS 性能始终优于远端蜂窝用户 U, 这是因为 U 在两个时隙中解码自己的信息时会将 DT 和 DR 的信息当作干扰, 相当于降低了 U 的安全容量。

(2) 用户 DT 的 PLS 性能还始终优于 DR, 这

是因为实际情况中基站的发射功率通常大于 D2D 发射端作为中继时的发射功率。

(3) DT 和 U 的渐近 SOP 曲线在高信噪比下均能够很好地逼近 SOP 仿真结果, 这表明了数值推导的正确性。

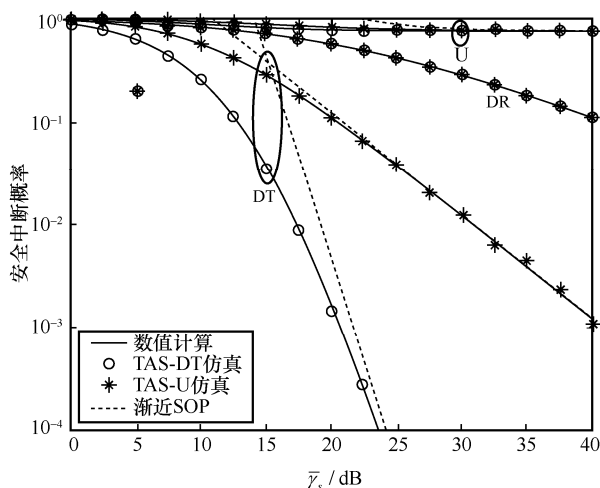


图 2 用户 DT、U 和 DR 的 SOP

图 3 给出了不同窃听链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_e$ 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 性能曲线, 可得以下结论。

(1) $\bar{\gamma}_e$ 的增加会严重影响 NOMA-D2D 协作无线系统的 PLS 性能。如 TAS-DT 方案下, 当 $\bar{\gamma}_s = 10$ dB 时, NOMA-D2D 协作无线系统在 $\bar{\gamma}_e$ 从 0 dB 增加到 5 dB 下的 SOP 由 0.45 恶化到 0.82。这是因为 $\bar{\gamma}_e$ 的增加相当于降低了 D2D 用户以及远端蜂窝用户的安全容量, 所以 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 显著增大, 其 PLS 性能降低。

表 1 NOMA-D2D 协作无线系统的仿真参数

参数名称	变量名	参数值	参数说明
发射天线数	M	4	图 2~图 6
S 的功率分配系数	a_1 、 a_2	0.2、0.8	图 2~图 4、图 6~图 7
DT 的功率分配系数	b_1 、 b_2	0.2、0.8	图 2~图 3、图 5~图 7
直传链路平均信噪比/dB	$\bar{\gamma}_s$	20	图 5
窃听链路平均信噪比/dB	$\bar{\gamma}_e$	10	图 2、图 4~图 6
目标安全速率/(bit·(s·Hz) ⁻¹)	R_1 、 R_2 、 R_3	0.1	图 2~图 4、图 6~图 7
式 (10)、式 (21)、式 (32) 中展开式项数	N	100	图 2~图 7



(2) NOMA-D2D 协作无线系统的安全性能在 TAS-DT 方案下优于 TAS-U 方案, 这是因为 U 的信道容量受限于 $S \rightarrow DT$ 链路及 $S \rightarrow U$ 、 $DT \rightarrow U$ 联合链路的较小信道容量, 因此可以着重考虑采用 TAS-DT 方案来提升 NOMA-D2D 协作无线系统的安全性能。

(3) NOMA-D2D 协作无线系统的渐近 SOP 曲线在高信噪下很好地逼近 SOP 曲线, 再次说明了数值推导的正确性。

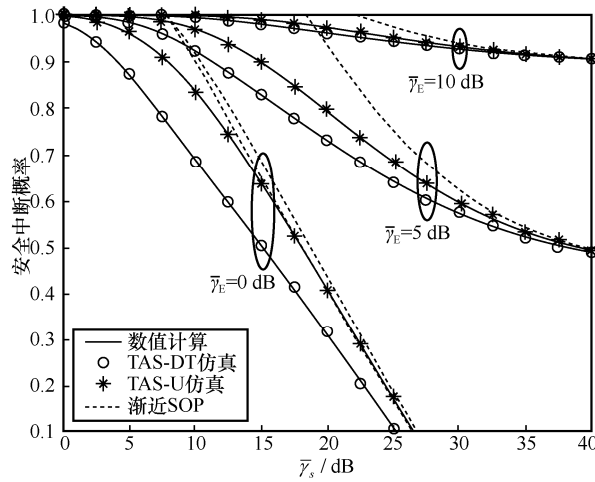


图3 不同 $\bar{\gamma}_E$ 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP

图 4 给出了不同中继功率分配系数 b_1 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 性能曲线。由图 4 可知, NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 随着 b_1 的增大而增大, 其 PLS 性能降低。如 TAS-DT 方案下, 当 $\bar{\gamma}_s = 25$ dB 时, NOMA-D2D 协作无线系统在 b_1 从 0.1 增大到 0.3 下的 SOP 由 0.70 恶化到 0.93。这是因为 DT 充当中继节点协助远端蜂窝用户 U 进行信息安全传输, 而 b_1 的增大导致 DT 分配给 U 的功率减小, 不能保证 U 的信息安全传输, 故 NOMA-D2D 协作无线系统的安全性能降低。此外, NOMA-D2D 协作无线系统在 TAS-DT 方案下相较于 TAS-U 方案具有更优的安全性能。

图 5 给出了不同目标安全速率 R_m 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 性能曲线, 可得以下结论。

(1) NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 随着

a_1 的增大而显著增大, 并且 a_1 必须在 0 到 0.5 之间。这是因为 a_1 减小 a_2 就增大, 在基站总功率恒定时分配给 U 的功率增加, 保证了远端蜂窝用户的信息安全传输, NOMA-D2D 协作无线系统的 PLS 性能提升。

(2) NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 随着各用户目标安全速率的增大而增大, 其 PLS 性能降低。如 TAS-DT 方案下, 当 $a_1 = 0.1$, $R_1 = R_2 = R_3 = 0.1$ 变为 $R_1 = 0.1, R_2 = 0.2, R_3 = 0.3$ 时, NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP 从 0.80 恶化到 0.92。这是因为目标安全速率越大, 对 DR、DT 以及 U 的信息安全传输要求越严格, 所需安全容量越高, 导致 NOMA-D2D 协作无线系统更容易发生安全中断, 其 PLS 性能也就越低。

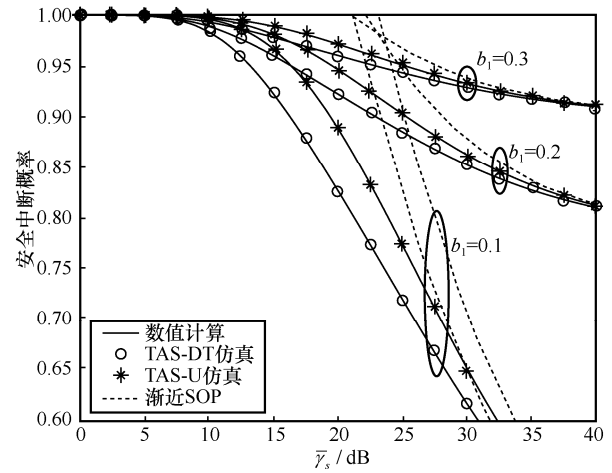


图4 不同 b_1 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP

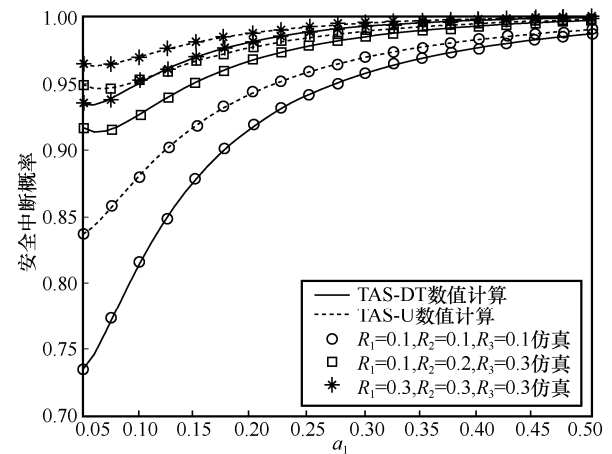


图5 不同 R_m 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 SOP

图 6 给出了用户 DT、U 和 DR 的 NZSCP 性能曲线, 可得以下结论。

(1) 两种方案下 DT、U 以及 DR 的 NZSCP 均随着 $\bar{\gamma}_s$ 的增加而增大, 其 PLS 性能越好。这是因为 DT、U 和 DR 的 NZSCP 越大, 其安全容量也越大, 窃听者 E 就越难窃听到用户 DT、U 和 DR 的机密信息, 故其安全性能越好。

(2) 图 2 和图 6 中的 DR 在 TAS-DT 和 TAS-U 方案下的安全性能一样, 这是因为 DR 只接收来自 DT 发射的信号, 所以基站 S 采用的两种 TAS 方案对 DR 没有影响。

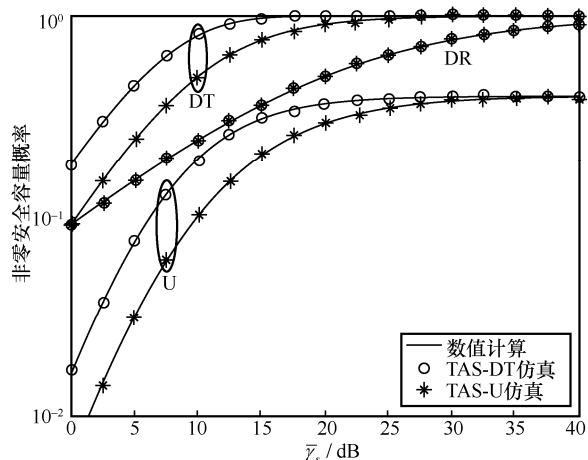


图 6 用户 DT、U 和 DR 的 NZSCP

图 7 给出了 TAS-DT 方案下不同发射天线数 M 和窃听链路平均信噪比 $\bar{\gamma}_E$ 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 性能曲线, 可得以下结论。

(1) 在相同 M 和 $\bar{\gamma}_E$ 下, NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 随着 $\bar{\gamma}_s$ 的增加而增大, 其 PLS 性能越好。这是因为基站和中继发射功率的增加, 提高了 DR 和 DT 的安全容量, 同时两个时隙中分配给远端蜂窝用户 U 的功率均增加, 大大提高了 U 的安全容量, 故 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 增大。

(2) 相同 $\bar{\gamma}_s$ 下, NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP 随着 M 的增加而增大。如当 NZSCP 为 0.1、 $\bar{\gamma}_E = 5$ dB 时, NOMA-D2D 协作无线系统在 M 从 1 增加到 4 下可获得约 4 dB 的信噪比增益。这是因为 S 采用 TAS 技术选取最优发射天线进行信息

安全传输, M 增加相当于增加了 DT 的安全容量, 故 NOMA-D2D 协作无线系统的安全性能得到了有效提升。

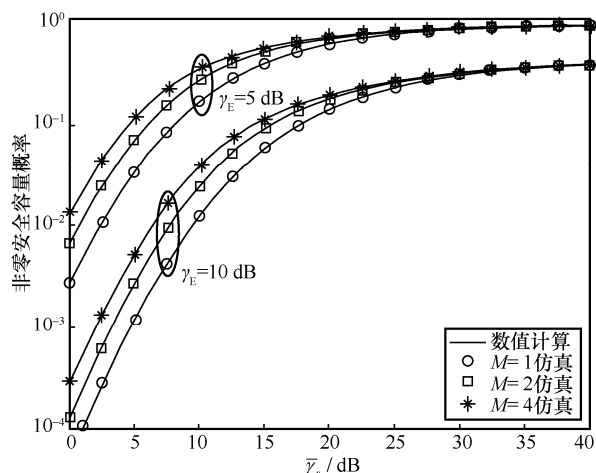


图 7 不同 M 和 $\bar{\gamma}_E$ 下 NOMA-D2D 协作无线系统的 NZSCP

5 结束语

本文推导了 TAS-DT 和 TAS-U 两种方案下 NOMA-D2D 协作无线系统的安全中断概率、非零安全容量概率和渐近安全中断概率近似表达式。通过数值计算和仿真实验表明: NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全性能在 TAS-DT 方案下优于 TAS-U 方案; 并且基站总功率恒定时增大分配给远端蜂窝用户的功率, 能够有效提升 NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全性能; 当基站发射天线数增加时, NOMA-D2D 协作无线系统具有更优的安全性能。后续笔者将进一步研究多窃听场景下 NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全性能。

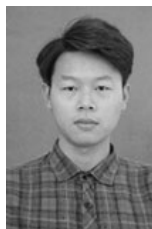
参考文献:

- [1] ANSARI R I, CHRYSOSTOMOU C, HASSAN S A, et al. 5G D2D networks: techniques, challenges, and future prospects[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3970-3984.
- [2] 易冰, 陈永丽, 赵瑞雪. 毫米波 5G 网络中 D2D 通信的资源分配方案[J]. 电信科学, 2019, 35(1): 144-152.
YI B, CHEN Y L, ZHAO R X. Resource allocation scheme for D2D communication in mmWave 5G networks[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(1): 144-152.
- [3] 田春生, 钱志鸿, 阎双叶, 等. D2D 通信中联合链路共享与



- 功率分配算法研究[J]. 电子学报, 2019, 47(4): 769-774.
- TIAN C S, QIAN Z H, YAN S Y, et al. Research on joint link sharing and power allocation algorithm for device-to-device communications[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(4): 769-774.
- [4] MACH P, BECVAR Z, NAJLA M. Resource allocation for D2D communication with multiple D2D pairs reusing multiple channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(4): 1008-1011.
- [5] WU Y P, KHISTI A, XIAO C S, et al. A survey of physical layer security techniques for 5G wireless networks and challenges ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(4): 679-695.
- [6] TREGANCINI A, OLIVO E E B, OSORIO D P M, et al. Performance analysis of full-duplex relay-aided NOMA systems using partial relay selection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 622-635.
- [7] SUN M Y, XU X D, TAO X F, et al. NOMA-based D2D-enabled traffic offloading for 5G and beyond networks employing licensed and unlicensed access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(6): 4109-4124.
- [8] KIM J B, LEE I H, LEE J H. Capacity scaling for D2D aided cooperative relaying systems using NOMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(1): 42-45.
- [9] CHENG J, LI H, GUO Y X, et al. Power allocation and receiver design for D2D assisted cooperative relaying downlink systems using NOMA[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 210663-210677.
- [10] CAI Y, KE C H, NI Y Y, et al. Power allocation for NOMA in D2D relay communications[J]. China Communications, 2021, 18(1): 61-69.
- [11] KHOSHAFAT M H, NGATCHED T M N, AHMED M H, et al. Secure transmission in wiretap channels using full-duplex relay-aided D2D communications with outdated CSI[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(8): 1216-1220.
- [12] KHOSHAFAT M H, NGATCHED T M N, AHMED M H, et al. Improving physical layer security of cellular networks using full-duplex jamming relay-aided D2D communications[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 53575-53586.
- [13] HYUN S H, YOON Y J, KIM S C. Physical layer security using artificial noise in D2D underlay network[C]//Proceedings of 2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [14] WANG H M, ZHAO B Q, ZHENG T X. Adaptive full-duplex jamming receiver for secure D2D links in random networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(2): 1254-1267.
- [15] LEI H J, ZHANG J M, PARK K H, et al. On secure NOMA systems with transmit antenna selection schemes[J]. IEEE Access, 2017, 5(1): 17450-17464.
- [16] ABBASI O, EBRAHIMI A. Secrecy analysis of a NOMA system with full duplex and half duplex relay[C]//Proceedings of 2017 Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [17] 李美玲, 李莹, Sami Muhaidat, 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.
- LI M L, LI Y, MUHAIDAT S, et al. Physical layer security for NOMA-based full duplex relay networks with non-ideal interference cancellation[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 183-189.
- [18] LEI H J, YANG Z X, PARK K H, et al. Secrecy outage analysis for cooperative NOMA systems with relay selection schemes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(9): 6282-6298.
- [19] 王夕予, 陈亚军, 肖敏, 等. 5G 非正交多址系统中使用全双工基站干扰的安全传输方案[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(8): 129-134.
- WANG X Y, CHEN Y J, XIAO M, et al. A secure transmission scheme using full-duplex base station jamming in 5G non-orthogonal multiple access systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(8): 129-134.
- [20] LI Q, REN P Y, DU Q H, et al. Safeguarding NOMA enhanced cooperative D2D communications via friendly jamming[C]//Proceedings of 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [21] LI Q, REN P Y, XU D Y. Security enhancement and QoS provisioning for NOMA-based cooperative D2D networks[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 129387-129401.
- [22] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series and products[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2007.

[作者简介]



丁一凡 (1996-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



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



李辉 (1996-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。