

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212366

多天线频谱共享 CR-NOMA 系统安全中断性能分析*

吕 铄¹ 嵇建波²

(1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 541004; 2. 桂林航天工业学院电子信息与自动化学院 桂林 541004)

摘要: 认知无线电(CR)非正交多址接入(NOMA)网络(记为 CR-NOMA)已是无线通信领域的研究热点之一。由于无线信道的开放性,使得无线网络的安全通信成为当前急需解决的问题。该文研究了频谱共享多天线 CR-NOMA 网络安全中断性能,首先分析了最优天线选择(OAS)方案的安全中断概率(SOP),并推导了其精确的闭合表达式。其次,分析了空时传输(STT)方案的 SOP,并推导了其精确的闭合表达式。最后,对次用户两种方案的 SOP 渐近性能进行了分析,揭示了系统参数对 SOP 的影响。最后,采用 Monte Carlo 仿真验证了理论分析的正确性。研究发现,两种方案基站分别存在一个最优峰值发射功率,使得远距离次用户的安全中断性能最佳。仿真结果表明增大基站峰值发射功率,OAS 方案的近距离次用户的 SOP 会始终优于 STT 方案,远距离次用户的 SOP 会劣于 STT 方案。

关键词: 认知无线电;非正交多址接入;安全中断性能;安全中断概率

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Secrecy outage performance of multi-antenna spectrum sharing
CR-NOMA systemLyu Shuo¹ Ji Jianbo²

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. School of Electronic Information and Automation, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Cognitive radio (CR) non-orthogonal multiple access (NOMA) network (recorded as CR-NOMA) is one of the research hotspots in the field of wireless communication. Due to the openness of wireless channel, the security communication of wireless network becomes an urgent problem. For the spectrum sharing multi-antenna CR-NOMA network, First, the secrecy outage probability (SOP) of the optimal antenna selection (OAS) scheme is analyzed, and its exact closed-form expression is derived. Secondly, the SOP of space-time transmission (STT) scheme is analyzed, and its exact closed-form expression is derived. Then, the asymptotic secrecy performance of secondary user SOP is analyzed to reveal the influence of system parameters on the secrecy communication performance. Finally, the Monte Carlo simulation is used to verify the correctness of theoretical analysis. It is found that there is an optimal transmit power in the base station under two schemes, which makes the secrecy outage performance of secondary user the best. The simulation results show that increase the peak transmission power of the base station, the secrecy outage performance of close secondary user under OAS scheme is always better than that of STT scheme, the secrecy outage performance of remote secondary user will be inferior to that of STT scheme.

Keywords: cognitive network; non-orthogonal multiple access; secrecy outage performance; secrecy outage probability

0 引 言

未来通信网络凭借全球覆盖、万兆通信能力、实时通信等特点,有望为智慧城市和物联网提供前所未有的机遇,但海量接入设备会使频谱资源更加紧缺。非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)和认知无线电

(cognitive radio, CR)技术可以大幅度提高频谱利用效率,已被公认为解决未来无线网络频谱资源问题的两种重要方案^[1-5]。结合 NOMA 和 CR 技术的优势,文献[6]研究了一种基于频谱共享模式的 CR-NOMA 网络,分析了次用户的连接中断性能,发现 CR-NOMA 系统的连接可靠性明显优于正交多址(orthogonal multiple access, OMA)系统。

收稿日期:2022-12-12

* 基金项目:国家自然科学基金(61650103)、广西自然科学基金(2018GXNSFAA281161)项目资助

由于无线网络信道开放性,无线网络的安全问题成为当前的研究热点。基于信息安全理论的物理层安全(physical layer security, PLS)技术成为重要的解决方案之一^[7-9]。文献[9]设计了一种 CR-NOMA 系统,该系统使用 PLS 技术实现安全通信,推导了次用户安全中断概率(secretcy outage probability, SOP)表达式,证实了 PLS 技术可提升 CR-NOMA 系统的安全中断性能。

同时,研究还发现多天线技术可以有效提升 CR-NOMA 网络的安全中断性能^[10-14]。文献[10]证明了多输入单输出(MISO)NOMA 系统的安全中断性能优于 MISO-OMA 系统。文献[11]分析了多天线 NOMA 系统的安全中断性能。研究表明:多天线技术可以有效提升系统的安全可靠性。文献[12]基于多天线 CR 网络提出了一种空时传输(space-time transmission, STT)方案,基站的所有天线同时向次用户接收机发射信号,研究表明 STT 方案能够提高 CR 网络连接可靠性。文献[13]分别研究了单天线 NOMA 网络和多天线 STT 方案 NOMA 网络的安全中断性能,仿真结果表明 STT 方案的安全中断性能远优于单天线方案。文献[14]提出一种最优天线选择(optimal antenna selection, OAS)方案,并分别研究了 OAS 方案和 STT 方案在 NOMA 系统中的安全中断性能。研究发现,OAS 方案的安全中断性能表现远优于 STT 方案。

通过上述文献发现,OAS、STT 方案能提高多天线 NOMA 网络的安全中断性能,并且 OAS 方案的性能表现更好。然而,OAS、STT 方案在 CR-NOMA 网络中的性能表现尚不明确。为此,本文考虑了一种多天线频谱共享 CR-NOMA 网络,分别推导了 OAS 方案和 STT 方案的次用户 SOP 精确闭合表达式,为进一步分析干扰温度、天线数、信号功率分配因子、基站峰值发射功率对次用户安全中断性能的影响,分析了次用户渐近安全中断性能。最后使用 Monte Carlo 仿真对理论分析进行验证,理论分析和仿真结果非常吻合,并得出结论:1)距离基站近的次用户在 OAS 方案的安全中断性能远优于 STT 方案。2)由于干扰温度的影响,距离基站远的次用户在 OAS 方案的安全中断性能会出现劣于 STT 方案的情况。3)OAS 方案和 STT 方案基站分别存在一个最优发射功率,使得远距离次用户的安全中断性能最优。

1 系统模型

考虑一个如图 1 所示的频谱共享 CR-NOMA 网络^[15],该网络由一个配备 M 根发射天线的认知基站(BS)、一个主用户接收节点(PD)、两个次用户接收节点(U_1 和 U_2)和一个窃听器(E)组成。假设主用户发射节点离次用户接收节点非常远,主用户对次用户接收节点的干扰可以忽略不计或近似为高斯白噪声,且 U_1 比 U_2 到 BS 的距离近。在每次传输时,BS 使用频谱共享技术传输信号,发射功率为

P_s 。假设从 BS 到 PD、 U_1 、 U_2 、 E 的信道服从独立 Rayleigh 分布,其信道功率增益服从均值为 $\lambda_j = 1/d_j^2$ 的独立指数分布^[16],其中用户索引 $j \in \{U_1, U_2, PD, E\}$, d_j 表示 BS 到用户 j 的信道传输距离, ϱ 是路径损耗因子。为了保证主用户的服务质量,考虑基站发射功率 P_s 同时受峰值发射功率和峰值干扰功率的约束,即表示为:

$$P_s = \begin{cases} P_t, & |h_{PD}|^2 \leq \frac{Q}{P_t} \\ \frac{Q}{|h_{PD}|^2}, & |h_{PD}|^2 > \frac{Q}{P_t} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_t 表示 BS 峰值发射功率, Q 表示干扰温度, $|h_{PD}|^2$ 表示 BS 和 PD 之间的干扰信道增益。

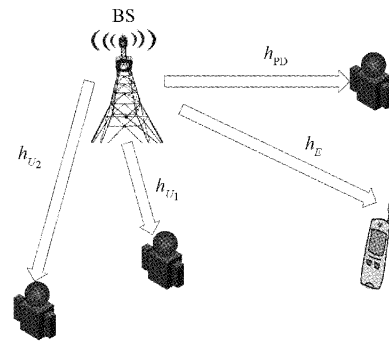


图 1 系统模型

BS 采用 NOMA 方式发送的叠加信号为:

$$x_{BS} = \sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2 \quad (2)$$

式中: x_1, x_2 分别表示 BS 给次用户 U_1, U_2 发送的信号。 α_1 和 α_2 是功率分配因子 ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$), 根据 NOMA 传输原理, 由于次用户 U_1 比 U_2 到 BS 的距离近, 假设 $\alpha_2 > \alpha_1$ 。

次用户 $U_i (i = 1, 2)$ 收到的信号可表示为:

$$y_{U_i} = h_{U_i} P_s (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) + z_{U_i} \quad (3)$$

其中, h_{U_i} 表示 BS 到次用户 i 链路的信道参数, z_{U_i} 是方差为 σ^2 的加性高斯白噪声 (additive white gaussian noise, AWGN)。根据 SIC 原理, 次用户 U_1 需要先解调 U_2 信息, 然后将 U_2 信息从 y_{U_1} 中减去, 最后可得到 U_1 信息。 U_1 在解码自身信号之前需要对 U_2 信号进行解码, U_1 处 U_2 信号功率与干扰和噪声功率之比 (SINR) $\gamma_{U_1 \rightarrow U_2}$ 为:

$$\gamma_{U_1 \rightarrow U_2} = \frac{\alpha_2 P_s |h_{U_1}|^2}{\alpha_1 P_s |h_{U_1}|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

在消除 U_2 信号的干扰后, U_1 的接收信号功率与噪声功率之比 (signal noise ratio, SNR) γ_{U_1} 为:

$$\gamma_{U_1} = \frac{\alpha_1 P_s |h_{U_1}|^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

次用户 U_2 直接进行干扰消除, 传输链路 BS $\rightarrow U_2$ 的 SINR γ_{U_2} 为:

$$\gamma_{U_2} = \frac{\alpha_2 P_s |h_{U_2}|^2}{\alpha_1 P_s |h_{U_2}|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

本文假设窃听器 E 在窃听 U_1 时可以通过 SIC 消除发送给 U_2 的信号,而在窃听 U_2 时将发送给 U_1 的信号作为噪声处理^[17]。因此,在窃听器 E 处接收的信号为:

$$y_E = h_E P_s (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) + z_E \quad (7)$$

z_E 是 AWGN。 E 接收信号中 U_1 信号 SNR γ_{E_1} 为:

$$\gamma_{E_1} = \frac{\alpha_1 P_s |h_E|^2}{\sigma^2} \quad (8)$$

同样, E 接收信号中 U_2 信号 SINR γ_{E_2} 为:

$$\gamma_{E_2} = \frac{\alpha_2 P_s |h_E|^2}{\alpha_1 P_s |h_E|^2 + \sigma^2} \quad (9)$$

2 安全中断性能

天线选择策略是影响无线网络安全中断性能的重要因素。本节对 OAS、STT 两种天线选择策略下次用户的安全中断性能 SOP 进行分析,接下来分别对安全容量和 SOP 进行说明。

安全容量是指 BS-用户的传输链路与 BS- E 的窃听链路的信道容量之差^[14]。因此,次用户 U_i 的安全容量 C_{s_i} ($i = 1, 2$) 为:

$$C_{s_i} = [C_i - C_{E_i}]^+ \quad (10)$$

式中: $[t]^+ = \max\{t, 0\}$, $C_i = \log_2(1 + \gamma_{U_i})$, $C_{E_i} = \log_2(1 + \gamma_{E_i})$ 。

SOP 定义为次用户 C_{s_i} 小于安全通信速率的概率。次用户 U_i 的 SOP 可以表示为:

$$P_{U_i, sop} = \Pr[C_{s_i} \leq R_i^s] \quad (11)$$

式中: R_i^s 是次用户 U_i 的安全通信速率。

2.1 OAS 方案

由于窃听器一般是被动工作的,BS 在信号传输过程中不能获取 BS- E 的实时信道状态信息(channel state information, CSI)^[14],但 BS 可以通过次用户的反馈信息获取 BS 到次用户的实时 CSI,OAS 方案是指 BS 向次用户传输信息时选择信道质量最佳的天线。不失一般性,考虑选择 M 根发射天线中的第 k 根作为最佳天线,发射功率为 P_s 。此方案是通过增加次用户信道容量来提高该用户的安全中断性能^[15]。

在通信网络中用户的安全级别往往不同^[18],下面讨论 U_1 、 U_2 分别作为高安全级别用户时的 OAS 方案。

1) OAS1

OAS1 方案是指 U_1 是安全级别高的用户,为了优先保证 U_1 的安全中断性能,BS 向 U_1 传输信息时选择信道质量最佳的天线。为了得到次用户 SOP,首先需要得到次用户、窃听者的 SINR (SNR) $\gamma_{i_i}^{OAS1}$ ($t \in \{U, E\}$, $i = 1, 2$) 和 OAS1 方案下的 BS-PD 的干扰信道增益 $|h_{PD}^{OAS1}|^2$ 的累积分布函数(CDF),它们分别为:

$$F_{\gamma_{U_1}^{OAS1}}(x) = \sum_{k=0}^M \binom{M}{k} (-1)^k e^{-\frac{k\sigma^2 x}{\lambda_{U_1} a_1 P_s}}, F_{\gamma_{U_2}^{OAS1}}(x) = 1 - e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{U_2} P_s (a_2 - a_1 x)}}, F_{\gamma_{E_1}^{OAS1}}(x) = 1 - e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{E_1} a_1 P_s}}, F_{\gamma_{E_2}^{OAS1}}(x) = 1 - e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{E_2} P_s (a_2 - a_1 x)}}$$

$$e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{E_2} P_s (a_2 - a_1 x)}}, F_{|h_{PD}|^2}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_{PD}}}$$

对上述的 CDF 求导,可以分别得到变量 $\gamma_{i_i}^{OAS1}$ ($t \in \{U, E\}$, $i = 1, 2$) 和 $|h_{PD}^{OAS1}|^2$ 的概率密度函数(probability density function, PDF)。

$$f_{\gamma_{U_1}^{OAS1}}(x) = \sum_{k=1}^M \binom{M}{k} (-1)^{k+1} \frac{k\sigma^2}{\lambda_{U_1} a_1 P_s} e^{-\frac{k\sigma^2 x}{\lambda_{U_1} a_1 P_s}}, f_{\gamma_{U_2}^{OAS1}}(x) = \frac{a_2 \sigma^2}{\lambda_{U_2} P_s (a_2 - a_1 x)^2} e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{U_2} P_s (a_2 - a_1 x)}}, f_{\gamma_{E_1}^{OAS1}}(x) = \frac{\sigma^2}{\lambda_{E_1} a_1 P_s} e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{E_1} a_1 P_s}}, f_{\gamma_{E_2}^{OAS1}}(x) = \frac{a_2 \sigma^2}{\lambda_{E_2} P_s (a_2 - a_1 x)^2} e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{E_2} P_s (a_2 - a_1 x)}}, f_{|h_{PD}|^2}(x) = \frac{1}{\lambda_{PD}} e^{-\frac{x}{\lambda_{PD}}}$$

将上述的 CDF、PDF 代入式(10)、(11),可以得到如下结论:

定理 1:频谱共享 CR-NOMA 系统采用 OAS1 方案的次用户 U_1 和 U_2 的 SOP 分别为:

$$P_{U_1, sop}^{OAS1} = \sum_{k=0}^M (-1)^k \binom{M}{k} \frac{\lambda_{U_1}}{\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1}} (1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}}) e^{-\frac{k\sigma^2 (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} a_1 P_s}} + \sum_{k=0}^M \binom{M}{k} (-1)^k e^{-\left(\frac{k\sigma^2 (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} a_1 Q} + \frac{1}{\lambda_{PD}}\right) \frac{Q}{P_t}} \times \frac{\lambda_{U_1} a_1 Q}{(\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1}) (\lambda_{PD} k \sigma^2 (\theta_1 - 1) + \lambda_{U_1} a_1 Q)} \quad (12)$$

$$P_{U_2, sop}^{OAS1} = 1 - (1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}}) \sum_{n=1}^N \frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E P_t 2N} \times \frac{e^{-\frac{\sigma^2 \nu_n}{\lambda_E P_t (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)} - \frac{\sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} P_t [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]}}}{\sum_{n=1}^N \frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{\lambda_{PD} (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E Q 2N \Delta_1} \Gamma\left(2, \frac{Q}{P_t \Delta_1}\right)} \quad (13)$$

$$\text{其中, } \omega = \frac{1}{\alpha_1 \theta_2} - 1 < \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \theta_2 = 2^{R_2^s}, \tau_n = \cos\left(\frac{2n-1}{2N} \pi\right), \Delta_1 = \frac{\sigma^2 \nu_n}{\lambda_E Q (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)} + \frac{\sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} Q [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]} + \frac{1}{\lambda_{PD}}, \nu_n = \frac{\omega (\tau_n + 1)}{2}, \theta_1 = 2^{R_1^s}, \Gamma(\cdot, \cdot) \text{ 为上限不完全伽玛函数。}$$

证明:

$$P_{U_1, sop}^{OAS1}(R_1^s | x) = \Pr[C_{s_1}^{OAS1} \leq R_1^s] = \Pr[\log_2(1 + \gamma_{U_1}^{OAS1}) - \log_2(1 + \gamma_{E_1}^{OAS1}) \leq R_1^s] = \int_{\omega_1}^{\omega_2} f_{\gamma_{E_1}^{OAS1}}(x) dx + \int_0^{\omega} F_{\gamma_{U_1}^{OAS1}}(\theta_1 x + \theta_1 - 1) f_{\gamma_{E_1}^{OAS1}}(x) dx = \sum_{k=0}^M (-1)^k \binom{M}{k} \frac{\lambda_{U_1}}{\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1}} (1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}}) e^{-\frac{k\sigma^2 (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} a_1 P_s}} \quad (14)$$

$$P_{U_2-sop}^{OAS1}(R_2^s | x) = \Pr[C_{\gamma_{E_2}}^{OAS1} \leq R_2^s] = \Pr[\log_2(1 + \gamma_{U_2}^{OAS1}) - \log_2(1 + \gamma_{E_2}^{OAS1}) \leq R_2^s] = \int_0^\omega F_{\gamma_{E_2}}^{OAS1}(\theta_2 x + \theta_2 - 1) f_{\gamma_{E_2}}^{OAS1}(x) dx + \int_\omega^{\alpha_2} f_{\gamma_{E_2}}^{OAS1}(x) dx \quad (15)$$

使用 Gaussian-Chebyshev quadrature, 式(15)可近似为:

$$P_{U_2-sop}^{OAS1}(R_2^s | x) = 1 - \sum_{n=1}^N \frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E P_s 2N} \times e^{-\left(\frac{\sigma^2 \nu_n}{\lambda_E P_s (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)} + \frac{\sigma^2 (\theta_2 \nu_n - \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} P_s [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n - \theta_2 - 1)]}\right)} \quad (16)$$

根据 BS 发射功率 $P_s = \min\left(P_t, \frac{Q}{|h_{PD}|^2}\right)$, 对式(14)、(16)中干扰信道增益变量 $|h_{PD}^{OAS1}|^2$ 求统计平均后可得到式(12)、(13) U_1 和 U_2 的 SOP。

通过式(12)和(13)可以发现, 次用户的 SOP 与基站峰值发射功率、功率因子、干扰温度、天线数等因素有关。由于次用户 SOP 表达式比较复杂, 很难直观发现 SOP 与系统参数之间的关系。下面对次用户渐近 SOP 性能进行分析, 讨论 SOP 与系统参数的关系。

推论 1: 假设 $P_t \gg Q$, U_1 和 U_2 的 SOP 渐近表达式为:

$$P_{U_1-sop}^{OAS1-Asym} = \frac{\sum_{k=0}^M \binom{M}{k} (-1)^k}{\lambda_{U_1}^2 \alpha_1 Q} \frac{1}{(\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1}) (\lambda_{PD} k \sigma^2 (\theta_1 - 1) + \lambda_{U_1} \alpha_1 Q)} \quad (17)$$

$$P_{U_2-sop}^{OAS1-Asym} = 1 - \sum_{n=1}^N \frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{\lambda_{PD} (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E Q N \Delta_1^2} \quad (18)$$

证明:

当 $P_t \gg Q$ 时, 干扰信道增益变量 $|h_{PD}^{OAS1}|^2$ 求统计平均时的积分上限趋近于正无穷, 次用户的渐近 SOP 可表示为:

$$P_{U_1-sop}^{OAS1-Asym} = \int_0^\infty f_{|h_{PD}|^2}^{OAS1}(x) \sum_{k=0}^M (-1)^k \binom{M}{k} \times \frac{\lambda_{U_1}}{\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1}} \left(1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t x}}\right) e^{-\frac{k \sigma^2 (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} \alpha_1 P_t}} dx + \int_0^\infty f_{|h_{PD}|^2}^{OAS1}(x) \sum_{k=0}^M (-1)^k \binom{M}{k} \times \frac{\lambda_{U_1}}{\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1}} \left(1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t x}}\right) e^{-\frac{k \sigma^2 (\theta_1 - 1) x}{\lambda_{U_1} \alpha_1 Q}} dx = \sum_{k=0}^M \binom{M}{k} (-1)^k \frac{\lambda_{U_1}^2 \alpha_1 Q}{(\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1}) (\lambda_{PD} k \sigma^2 (\theta_1 - 1) + \lambda_{U_1} \alpha_1 Q)} \quad (19)$$

U_1 与 U_2 的 SOP 渐近表达式证明类似, 故 U_2 的 SOP 渐近表达式在式(18)中直接给出。

通过式(17)和(18)可以发现, 1) 适当增加天线数可以有效提高 U_1 的安全中断性能, 不能提高 U_2 的安全中断性能, 这与实际情况相符。2) OAS1 方案下系统的安全中断

性能上限由于干扰温度决定。

推论 2: 为了进一步得到 P_t 与 U_2 的安全中断性能的关系, 对式(13)求导可得到:

$$\frac{d(P_{U_2-sop}^{OAS2})}{d(P_t)} = \sum_{n=1}^N \frac{A_n B_n}{P_t} e^{\frac{\Lambda_n + B_n}{P_t}} \left(1 - \frac{B_n + C_n}{P_t}\right) \quad (20)$$

其中, $A_n = \frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E 2N}$, $B_n = \frac{\sigma^2 \nu_n}{\lambda_E (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)}$ - $\frac{\sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]}$, $C_n = \frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{\lambda_{PD} (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E Q 2N \Delta_1^2}$

由式(20)和图 2 可以发现, U_2 的 SOP 是关于 P_t 的先减后增函数, 因此 BS 存在一个最优 P_t , 即 $P_t = B_n + C_n$ 时, 使得 U_2 的安全中断性能最佳。

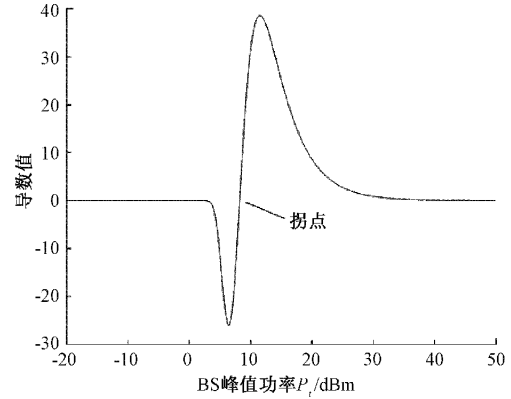


图 2 BS 峰值发射功率导数图

2) OAS2

OAS2 方案是指 U_2 是保密级别高的用户时, 为了优先保证 U_2 的安全中断性能, BS 向 U_2 传输信息时选择信道质量最佳的天线。OAS2 方案下变量 γ_{E_i} 、 $|h_{PD}|^2$ 的 CDF 和 PDF 与 OAS1 方案相同, 次用户和窃听链路的 SNR (SINR) γ_{U_i} 的 CDF 和 PDF 分别为:

$$F_{\gamma_{U_1}}^{OAS2}(x) = 1 - e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{U_1} \alpha_1 P_t}}, F_{\gamma_{U_2}}^{OAS2}(x) = \sum_{k=0}^M (-1)^k \binom{M}{k} \times e^{-\frac{k \sigma^2 x}{\lambda_{U_2} P_s (\alpha_2 - \alpha_1 x)}} , f_{\gamma_{U_1}}^{OAS2}(x) = \frac{\sigma^2}{\lambda_{U_1} \alpha_1 P_s} e^{-\frac{\sigma^2 x}{\lambda_{U_1} \alpha_1 P_t}} , f_{\gamma_{U_2}}^{OAS2}(x) = \sum_{k=1}^M (-1)^k \binom{M}{k} \times \frac{k \alpha_2 \sigma^2}{\lambda_{U_2} P_s (\alpha_2 - \alpha_1 x)^2} e^{-\frac{k \sigma^2 x}{\lambda_{U_2} P_s (\alpha_2 - \alpha_1 x)}} .$$

类似于 OAS1 中次用户 SOP 推导, U_1 和 U_2 采用 OAS2 方案的 SOP 分别为:

$$P_{U_1-sop}^{OAS2} = \left(1 - \frac{\lambda_{U_1}}{\lambda_E \theta_1 + \lambda_{U_1}} e^{-\frac{\sigma^2 (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} \alpha_1 P_t}}\right) \left(1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}}\right) - \frac{\lambda_{U_1}^2 \alpha_1 Q}{(\lambda_E \theta_1 + \lambda_{U_1}) (\lambda_{PD} \sigma^2 (\theta_1 - 1) + \lambda_{U_1} \alpha_1 Q)} \times e^{-\left(\frac{\sigma^2 (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} \alpha_1 Q} + \frac{1}{\lambda_{PD}}\right) \frac{Q}{P_t}} + e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}} \quad (21)$$

$$P_{U_2-sop}^{OAS} = 1 + \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^N \binom{M}{k} (-1)^k \frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{\lambda_{PD} (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E Q 2N \Delta_2^2} \times$$

$$\Gamma\left(2, \frac{Q}{P_t \Delta_2}\right) + (1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}}) + \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^N \binom{M}{k} (-1)^k \times$$

$$\frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E P_t 2N} e^{-\frac{\sigma^2 \nu_n}{\lambda_E P_t (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)}} \times e^{-\frac{\sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} P_t [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]}}$$
(22)

$$\text{其中, } \Delta_2 = \frac{\sigma^2 \nu_n}{\lambda_E Q (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)} +$$

$$\frac{k \sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} Q [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]} + \frac{1}{\lambda_{PD}}$$

类似 OAS1 方案下推论 1 和推论 2 的证明,可以得到如下结论:1)适当增加天线数可以有效提高 U_2 的安全中断性能,不能提高 U_1 的安全中断性能。2)OAS2 方案下系统的安全中断性能受干扰温度制约。3)当 $P_t = D_n$ 时, U_2 的安全中断性能最好。

$$\text{其中, } D_n = \frac{\sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]} +$$

$$\frac{\sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{\lambda_{PD} (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E Q 2N \Delta_1^2}$$

2.2 STT 方案

首先 BS 使用空时编码技术对次用户信号进行编码,该技术以两个发送符号为一个传输单元,再构建空时编码传输矩阵^[19]。BS 的 M 根发射天线都参与信号编码并将信号发送到次用户接收节点,所有天线的发射功率总量被限制为 P_s 。为简化计算,考虑等功率分配方法,假设 BS 的每根天线发射功率为 P_s/M ^[13-14],次用户和窃听者的 SNR (SINR) $\gamma_{i_1}^{STT}$ 和主用户干扰信道的 $|h_{PD}^{STT}|^2$ 的 CDF 和 PDF 分别为:

$$F_{\gamma_{i_1}^{STT}}(x) = \sum_{k=0}^M \binom{M}{k} (-1)^k e^{-\frac{k \sigma^2 x}{\lambda_{U_1} a_1 P_s}}, F_{\gamma_{i_2}^{STT}}(x) =$$

$$\sum_{k=0}^M (-1)^k \binom{M}{k} e^{-\frac{k \sigma^2 x}{\lambda_{U_2} P_s (\alpha_2 - \alpha_1 x)}}, F_{|h_{PD}|^2}(x) = \sum_{k=0}^M (-1)^k \times$$

$$\binom{M}{k} e^{-\frac{kx}{\lambda_{PD}}}, f_{\gamma_{i_1}^{STT}}(x) = \sum_{k=1}^M \binom{M}{k} (-1)^{k+1} \frac{k \sigma^2}{\lambda_{U_1} a_1 P_s} e^{-\frac{k \sigma^2 x}{\lambda_{U_1} a_1 P_s}},$$

$$f_{\gamma_{i_2}^{STT}}(x) = \sum_{k=1}^M (-1)^k \binom{M}{k} \frac{k a_2 \sigma^2}{\lambda_{U_2} P_s (\alpha_2 - \alpha_1 x)^2} e^{-\frac{k \sigma^2 x}{\lambda_{U_2} P_s (\alpha_2 - \alpha_1 x)}},$$

$$f_{|h_{PD}|^2}(x) = \frac{k}{\lambda_{PD}} \sum_{k=1}^M (-1)^{k-1} \binom{M}{k} e^{-\frac{kx}{\lambda_{PD}}}.$$

类似于 OAS 方案 SOP 的推导,可以得到 U_1, U_2 采用 STT 方案的 SOP 分别为:

$$P_{U_1-sop}^{STT} = \sum_{k=0}^M \sum_{s=1}^M \sum_{l=1}^M (-1)^{k+s+l} \binom{M}{k} \binom{M}{s} \binom{M}{l} \times$$

$$\frac{\lambda_{U_1} s}{\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1} s} e^{-\frac{k M \sigma^2 (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} a_1 P_t}} (1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}}) -$$

$$\sum_{k=0}^M \sum_{s=1}^M \sum_{l=1}^M (-1)^{k+s+l} \binom{M}{k} \binom{M}{s} \binom{M}{l} \times$$

$$\frac{s \lambda_{U_1}^2 \alpha_1 Q}{e^{\frac{\sigma^2 k (\theta_1 - 1)}{\lambda_{U_1} a_1 Q + \lambda_{PD}}} \frac{Q}{P_t}}$$

$$\frac{1}{(\lambda_E k \theta_1 + \lambda_{U_1} s) (\lambda_{PD} k \sigma^2 (\theta_1 - 1) + \lambda_{U_1} \lambda \alpha_1 Q)}$$
(23)

$$P_{U_2-sop}^{STT} = 1 + \sum_{k=1}^M \sum_{s=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{n=1}^N (-1)^{k+s+l} \binom{M}{k} \binom{M}{s} \binom{M}{l} \times$$

$$(1 - e^{-\frac{Q}{\lambda_{PD} P_t}}) \frac{s \sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E P_t 2N} \times$$

$$e^{-\frac{M \sigma^2 \nu_n}{\lambda_E P_t (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)}} e^{-\frac{M k \sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} P_t [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]}} +$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{s=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{n=1}^N (-1)^{k+s+l} \binom{M}{k} \binom{M}{s} \binom{M}{l} \times$$

$$\frac{l s \sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{\lambda_{PD} (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E Q 2N \Delta_3^2} \Gamma\left(2, \frac{Q}{P_t M \Delta_3}\right)$$
(24)

$$\text{其中, } \Delta_3 = \frac{s \sigma^2 \nu_n M}{\lambda_E Q (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)} +$$

$$\frac{k \sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1) M}{\lambda_{U_2} Q [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]} + \frac{l}{\lambda_{PD}}$$

类似 OAS 方案的推论,可以得到如下结论:1)适当增加天线数可以同时提高 U_1 和 U_2 的安全中断性能。2)STT 方案下系统的安全中断性能受干扰温度制约。3)当 $P_t = E_n + F_n$ 时, U_2 的安全中断性能最好。

$$\text{其中, } E_n = \sum_{s=1}^M \frac{s \sigma^2 \nu_n \omega \pi}{\lambda_E (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)} - \frac{\sigma^2 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)}{\lambda_{U_2} [\alpha_2 - \alpha_1 (\theta_2 \nu_n + \theta_2 - 1)]},$$

$$F_n = \sum_{s=1}^M \frac{s \sigma^2 \alpha_2 \omega \pi \sqrt{1 - \tau_n^2}}{\lambda_{PD} (\alpha_2 - \alpha_1 \nu_n)^2 \lambda_E Q 2N \Delta_2^2}$$

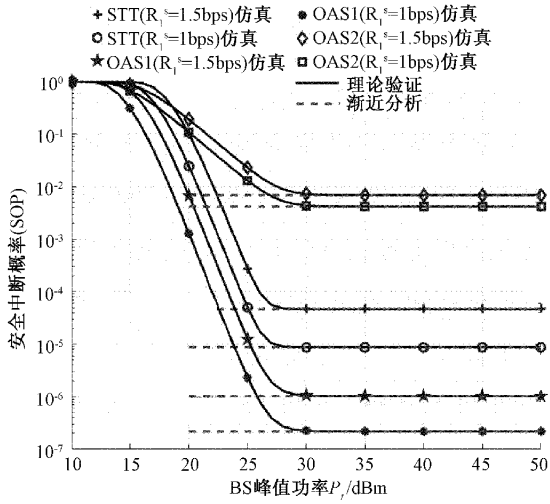
本节研究了 OAS 和 STT 方案下次用户的安全中断性能,得到了次用户通信的 SOP 闭合表达式,并分析了次用户的渐近安全中断性能,得到了系统参数与安全中断性能的关系。下面通过 Monte Carlo 仿真验证理论分析的正确性。

3 仿真结果与分析

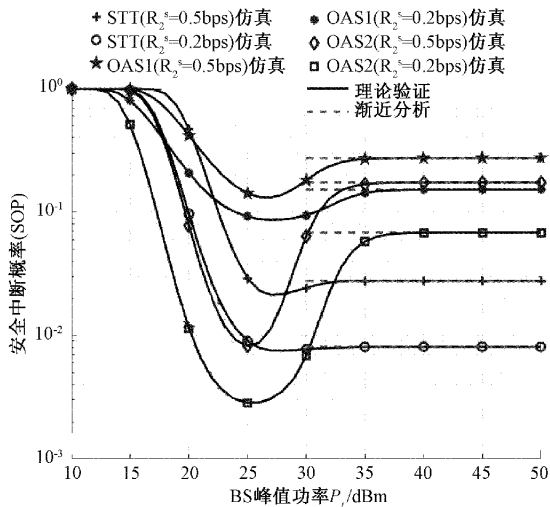
本节在密集异构蜂窝下行网络场景^[13]下研究系统的安全中断性能,利用理论曲线和仿真结果分析了系统参数对安全中断性能指标的影响。除非特殊说明,设定功率分配因子 $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 0.9$,用户接收点与 BS 距离 $d_{PD} = 800$ m, $d_{U_1} = 200$ m, $d_{U_2} = 700$ m, $d_E = 1300$ m,衰落系数 $\vartheta = 4$,干扰温度 $Q = -3$ dBm,噪声功率为 0.01 W。假设次用户安全通信速率 $R_1^s = 0.5$ bps, $R_2^s = 0.3$ bps。

图 3 是次用户 SOP 与 BS 峰值发射功率、安全通信速率的关系图。从仿真图 3(a)和(b)可得出以下结论:1)理论分析和蒙特卡洛仿真结果非常吻合,验证了理论分析的正确性。2)当 R_1^s 和 R_2^s 增大, U_1 和 U_2 的 SOP 会变大,安

全中断性能变差。这是因为 R_1 和 R_2 增大后, 中断阈值也增大了。3) 当 $P_i \gg Q$ 时, U_1 和 U_2 的 SOP 最终趋于常数, 说明系统的安全中断性能达到上限。渐近曲线进一步验证了推论 1 的正确性。4) U_1 的 SOP 随着 P_i 增大而减小, OAS1 方案下 U_1 的安全中断性能最好。这是因为增大 BS 发射功率能提高次用户的安全容量。 U_2 的 SOP 先减小后增大, $P_i = 25$ dBm 时, OAS2 方案下 U_2 的安全中断性能最好。验证了推论 2 的分析正确性。



(a) U_1 的 SOP

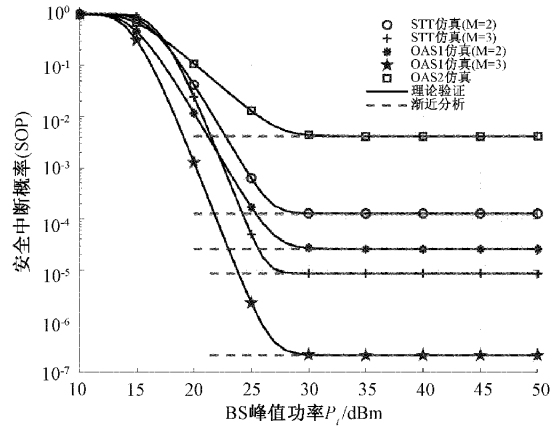


(b) U_2 的 SOP

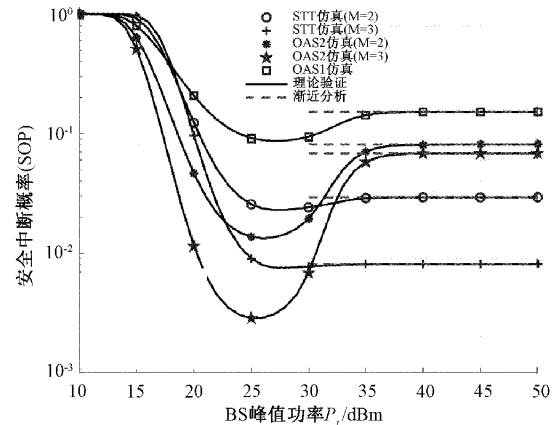
图 3 次用户 SOP 与 BS 峰值发射功率、安全通信速率关系图

图 4 是次用户 SOP 与 BS 峰值发射功率、天线数的关系图。从仿真图 4(a) 和 (b) 中可得出以下结论: 1) 当 $M = 2$ 时, U_1 、 U_2 的 SOP 在 STT 方案下可以减小到 10^{-4} 、 5×10^{-2} , 在 OAS 方案下可以减小到 5×10^{-5} 、 10^{-2} , 这说明低信噪比时 OAS 方案的系统安全中断性能更好。2) 当 M 从 2 增加到 3 时 U_1 使用 STT 方案和 OAS 方案的安全中断性能分别增强了 10 倍、100 倍。 U_2 使用 STT 方案和 OAS 方案的安全中断性能分别增强了 5 倍、10 倍。说明增加天线

数目能提高系统安全中断性能。



(a) U_1 的 SOP

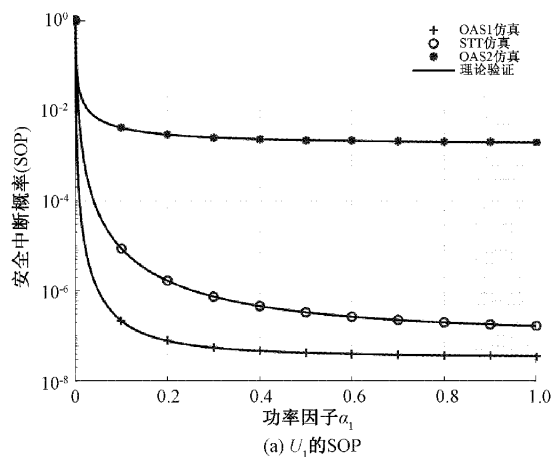


(b) U_2 的 SOP

图 4 次用户 SOP 与 BS 天线数、峰值发射功率关系图

图 5 是次用户 SOP 与功率因子 α_1 变化的关系图。设定 $M = 3$, $P_i = 70$ dBm, 从仿真图 5(a)、(b) 可以得到以下结论: 当增大 α_1 时, U_1 的 SOP 变小, 安全中断性能变好, U_2 的 SOP 变大, 安全中断性能变差。这是因为 α_1 变大, U_1 接收信号 x_1 的 SNR 也随之变大, 安全容量变大, BS- U_2 链路中信号 x_1 的 SINR 变大, 安全容量减小。

图 6 表示了次用户 SOP 与 BS 峰值功率、干扰温度的



(a) U_1 的 SOP

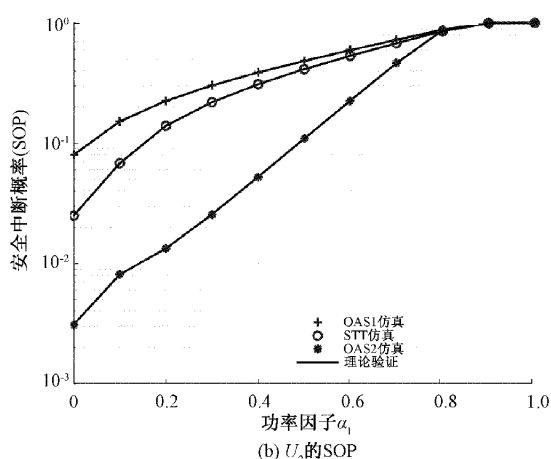


图 5 次用户 SOP 与功率因子的关系图

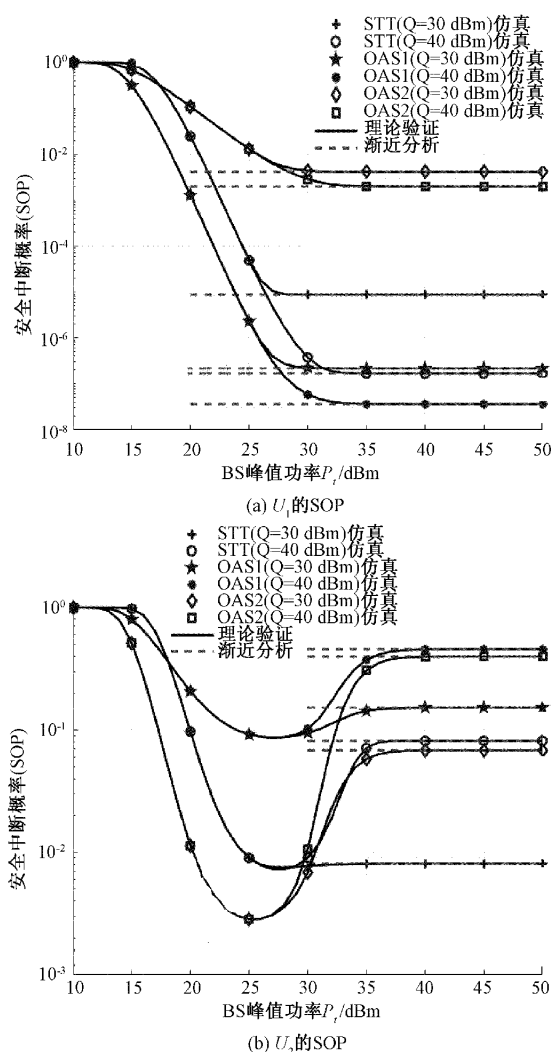


图 6 安全中断概率与干扰温度的关系图

关系。从仿真图 6(a)和(b)中可以看出:1)次用户 U_1 和 U_2 的 SOP 受干扰温度 Q 约束,最终趋于常数。这是因为 $P_t \gg Q$ 时安全容量达到限度,符合推论 1 和推论 2 的分

析。渐近分析曲线进一步验证了该结论。2) P_t 超过 30 dBm 后,OAS 方案下 U_2 的 SOP 大于 STT 方案,安全中断性能变差。这说明 OAS 方案下 U_2 的安全中断性能不会一直优于 STT 方案。

4 结 论

本文针对频谱共享多天线 CR-NOMA 系统的安全中断性能问题,分别推导了 OAS 方案和 STT 方案的次用户 SOP 精确闭合表达式,并进行了 SOP 渐近性能分析,得到了系统参数与次用户安全中断性能的关系。仿真结果验证了理论分析的正确性,并得到了一些有益结论。本文的工作结果证实了使用 OAS 方案和 STT 方案来防止窃听的安全优势,将有利于设计具有 TAS 的实用 CR-NOMA 系统。在未来的工作中考虑两个次用户拓展到多用户,研究多用户的安全中断性能。

参考文献

- [1] 谢显中,罗莹,严可,等. 认知无线网络中四维资源协作的研究现状与未来方向[J]. 通信学报,2018,39(2): 149-163.
- [2] 陈兵,胡峰,朱琨. 认知无线电研究进展[J]. 数据采集与处理,2016,31(3):440-451.
- [3] DING Z, LEI X, KARAGIAN G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.
- [4] 张凯萍,杨杨. 面向非正交多址接入的 FSO-RF 混合链路的中断概率性能分析[J]. 国外电子测量技术,2022, 41(5):26-30.
- [5] PEI X, YU H, WEN M, et al. Secure outage analysis for cooperative NOMA systems with antenna selection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4):4503-4507.
- [6] ZHANG Y, LIU J, PENG Y, et al. Performance analysis of Intelligent CR-NOMA model for industrial IoT communications [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 3(2):452-464.
- [7] WU Y, KHISTI A, XIAO C, 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.
- [8] 任品毅,唐晓. 面向 5G 的物理层安全技术综述[J]. 北京邮电大学学报,2018,41(5):69-77.
- [9] NGUYEN H N, NGUYEN N L, NGUYEN N T, et al. Reliable and secure transmission in multiple antennas hybrid satellite-terrestrial cognitive networks

- relying on NOMA[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(21): 5044-5056.
- [10] FENG Y, YAN S, LIU C, et al. Two-stage relay selection for enhancing physical layer security in non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2018, 14(6): 1670-1683.
- [11] LIU Y, QIN Z, ELKA M, et al. Enhancing the physical layer security of non-orthogonal multiple access in large-scale networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3): 1656-1672.
- [12] ZHU J, ZOU Y, WANG G, et al. On secrecy performance of antenna-selection-aided MIMO systems against eavesdropping [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(1):214-225.
- [13] LEI H, GAO C, ANSARI I S, et al. Secrecy outage performance of transmit antenna selection for MIMO underlay cognitive radio systems over Nakagami-m channels [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 66(3): 2237-2250.
- [14] LEI H, ZHANG J, PARK K H, et al. On secure NOMA systems with transmit antenna selection schemes [J]. *IEEE Access*, 2017, 5(99): 17450-17464.
- [15] QIN M, YANG S, DENG H, et al. Enhancing security of primary user in underlay cognitive radio networks with secondary user selection [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 32624-32636.
- [16] 张迎华. 无线通信网络非正交协作传输关键技术研究[D]. 北京:北京科技大学, 2020.
- [17] GHOU S M, ABBAS Z H, HASSAN A K, et al. Performance analysis and beamforming design of a secure cooperative MISO-NOMA network [J]. *Sensors*, 2021, 21(12):4180-4183.
- [18] XIANG Z, YANG W, CAI Y, et al. Secure transmission in a NOMA-assisted IoT network with diversified communication requirements [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(11): 11157-11169.
- [19] SINGH S and BANSAL M. On the outage performance of overlay cognitive STBC-NOMA System with imperfect SIC [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(11):2587-2591.

作者简介

吕铄, 硕士研究生, 主要研究方向为认知无线电、非正交多址接入技术、物理层安全技术。

嵇建波(通信作者), 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为认知无线电、非正交多址接入技术、物理层安全技术、智能表面发射技术。

E-mail: jijianbo@guat.edu.cn