

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.015

## NOMA 技术下的星地融合网络安全性能分析

郭克锋<sup>1</sup>, 安康<sup>2</sup>, 臧晓尧<sup>1</sup>

(1. 航天工程大学航天信息学院, 北京 101416; 2. 国防科技大学第 63 研究所, 南京 210007)

**摘要:** 针对多窃听用户下的基于非正交多址接入技术的星地融合网络, 研究了其安全性能, 特别地, 窃听用户应用联合窃听策略, 联合窃听策略顾名思义就是每一个窃听用户相互合作去窃听主用户的信息。本文首先推导得到了所考虑系统安全中断概率的闭式解, 为了进一步获得高信噪比下评估系统性能的参量, 其次得到了安全中断概率的渐进解, 通过渐进解可找到一种有效的手段来评估非正交多址接入技术和联合窃听策略的特点, 理论结果显示窃听用户数目以及信道条件好坏对系统性能有着巨大影响, 最后蒙特卡洛仿真验证了理论分析的正确性。得到的理论解和仿真解可指导工程实践设计。

**关键词:** 非正交多址接入; 星地融合网络; 安全中断概率; 联合窃听

**中图分类号:** TN927      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0090-07

## Secrecy Performance Analysis of NOMA-Based Integrated Satellite-Terrestrial Relay Networks

GUO Kefeng<sup>1</sup>, AN Kang<sup>2</sup>, ZANG Xiaoyao<sup>1</sup>

(1. School of Space Information, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Sixty-Third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** This paper studies the secrecy performance of non-orthogonal multiple access (NOMA)-based integrated satellite-terrestrial relay networks (ISTRNs). In this study, colluding eavesdropping case is considered, namely, the eavesdroppers cooperate with each other to overhear the legitimate information. Specially, we derive the closed-form expression for the secrecy outage probability (SOP) of the considered NOMA-based ISTRNs for the colluding eavesdropping case. In order to obtain further insights at high signal-to-noise ratios (SNRs), the asymptotic expression for the SOP is also given to provide an efficient mean to evaluate the benefit of NOMA scheme and the impact of colluding eavesdropping on SOP. The number of the eavesdroppers and the channel fading have great impact on the secrecy performance. Finally, numerical Monte Carlo (MC) results are given to verify the correctness of the theoretical results. The results can provide the theoretical extremum for the practical works.

**Key words:** non-orthogonal multiple access (NOMA); integrated satellite-terrestrial relay network (ISTRN); secrecy outage probability (SOP); colluding eavesdropping

卫星通信 (Satellite communication, SatCom) 由于其增强和扩展无线覆盖的能力使其成为第五代 (5 generations, 5G) 及以后的 5G (Beyond 5 generations, B5G) 网络的重要组成部分<sup>[1-4]</sup>。但是, 由

于卫星通信的链路通常由于存在障碍物等原因导致卫星和地面用户之间的阴影, 导致视线 (Line of sight, LOS) 通信不可用<sup>[5]</sup>。因此, 可充分利用地面中继同时结合卫星通信的特点<sup>[6]</sup>, 从而形成星地

**收稿日期:** 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-25

**通信作者:** 郭克锋, 男, 讲师, 硕士生导师, E-mail: guokefeng.cool@163.com。

**引用格式:** 郭克锋, 安康, 臧晓尧. NOMA 技术下的星地融合网络安全性能分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 90-96. GUO Kefeng, AN Kang, ZANG Xiaoyao. Secrecy performance analysis of NOMA-based integrated satellite-terrestrial relay networks[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 90-96.

融合网络(Integrated satellite terrestrial relay network, ISTRN)来弥补这一缺点。星地融合网络的主要思想是利用地面中继传输卫星信号,这正成为卫星通信系统的体系结构,特别是对于固定卫星服务和高速宽带移动卫星服务。在文献[7]中,作者得到了在自适应传输方案下不同方案的可实现信道容量的解析表达式。在文献[8]中,当ISTRN网络存在多个地面中继时,作者提出了一种ISTRN网络中的传输链路选择方案。在文献[9]中,作者研究了一个认知基础下的星地融合网络,其中Meijer-G函数用于导出所考虑系统的次级地面网络中断的概率。在文献[10]中,作者研究了硬件损伤在认知星地融合网络中的影响。

如前所述,ISTRN已被证明是克服遮挡效应的有效途径及改进措施提高频谱效率的可靠性。与此同时,非正交多址(Non-orthogonal multiple access, NOMA)方案也被证明是一种很有前途的提高未来无线接入系统频谱利用率的方法<sup>[11-13]</sup>。相比使用传统的正交多址(Orthogonal multiple access, OMA),在系统中,由于NOMA固有的优点,如频带利用率高、低延迟、高吞吐量,其被认为是对于5G甚至于B5G通信网中的接入技术一种潜在的技术标准<sup>[14-15]</sup>。

由于卫星波束覆盖范围广等原因,基于NOMA的星地融合网络经常存在安全问题。目前,基于NOMA的无线通信系统的安全问题日益突出<sup>[16-20]</sup>。在文献[16]中,作者分析了对于单输入单输出(Single input single output, SISO)NOMA网络中安全速率最大化问题。在文献[17]中,作者分析了基于max-min方案和NOMA技术下的多输入输出(Multiple input multiple output, MIMO)系统的安全中断概率。在文献[18]中,作者研究了基于两种中继选择策略下的NOMA系统的安全性,其中中继是随机分布并且采用译码转发和放大转发两种转发模式的中继节点。在文献[19]中,作者研究了基于协作NOMA的系统物理层安全性,特别地,作者得到了中断概率的闭式表达式。

然而,在公开发表的论文中,卫星通信中基于NOMA技术的研究仅在文献[20]中出现过,作者研究了在频域共享的情况下所考虑系统的安全中断概率。

综上,本文研究了基于NOMA技术下的星地融合网络中的多窃听用户安全问题,特别是在联合窃听策略下的安全传输问题。本文的主要创新点如下:

(1) 建立了基于NOMA技术的星地融合网络安全传输框架,在这个网络中,包含一个卫星,一个地面中继,多个窃听者和两个潜在的主用户。

(2) 在联合窃听策略的基础上分析了所考虑系统模型的安全性,安全中断概率(Secrecy outage probability, SOP)的闭式解提供了一种快速验证系统安全性能的方法。

(3) 为进一步得到所考虑系统参数对于安全性能在高信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)下的影响,本文得到了高SNR下安全中断概率的渐进解,通过渐进解可得到联合窃听策略下的系统安全分集增益和系统安全编码增益。

## 1 系统模型和问题建模

如图1所示,本文研究了基于NOMA的星地融合安全网络,其包含了1个卫星(S),1个地面中继(R),2个地面接收端( $D_1$ 和 $D_2$ ),还有 $N$ 个窃听用户。中继 $R$ 应用译码转发策略。整个通信系统将占用2个时隙,由于雷雨,大雾和其他不确定因素,在此模型中不考虑 $S$ 和 $D_i$ ( $i \in 1, 2$ )和窃听用户( $E$ )之间的直传链路。为了不失一般性,在所考虑系统中的所有传输节点都假设装备单天线。

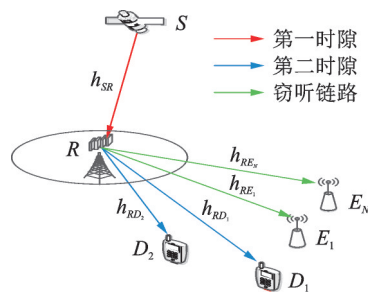


图1 系统模型

Fig.1 System model

在第一个时隙, $S$ 将其信号 $s(t)$   $\left( E \left[ |s(t)|^2 \right] = 1 \right)$ 传输到中继 $R$ ,则在中继 $R$ 处得到的信号为

$$y_R(t) = f_{SR} \sqrt{P_S} s(t) + n_R(t) \quad (1)$$

式中: $f_{SR}$ 表示 $S$ 到 $R$ 之间的信道衰落变量,其通常被建模为阴影莱斯(Shadowed-Rician, SR)信道, $P_S$ 表示从 $S$ 传输的信号能量,由于传输过程中应用NOMA技术,则传输的信号可表示为 $s(t) = a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t)$ ,其中 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 是传输到 $D_1$ 和 $D_2$ 的信号。进一步,由于 $D_1$ 的信道衰落比 $D_2$ 的衰落要严重,由此假设 $a_1 > a_2$ ,在此基础上, $D_1$ 被分配更多的能量, $a_1$ 和 $a_2$ 是对于用户 $D_1$ 和 $D_2$ 的功率分配因子。特别地, $a_1^2 + a_2^2 = 1$ 。 $n_R(t)$ 为在中

继  $R$  处的高斯白噪声信号,其分布为  $n_R(t) \sim \mathcal{CN}(0, \delta_R^2)$ 。

当中继  $R$  接收到传来的信号后,完美的串行干扰消除技术 (Successive interference cancellation, SIC)<sup>[11]</sup> 用来解码信号,其具体为:首先  $x_1(t)$  先被解码,然后从信号中剔除,最后  $x_2(t)$  在中继  $R$  处从剩余的信号解码。

因此,在中继  $R$  处解码  $x_1(t)$  后得到的信干噪比 (Signal-to-interference-plus noise ratio, SINR) 为

$$\gamma_{R,1} = \frac{|f_{SR}|^2 P_S a_1^2}{|f_{SR}|^2 P_S a_2^2 + \delta_R^2} = \frac{\gamma_1 a_1^2}{\gamma_1 a_2^2 + 1} \quad (2)$$

$$\text{式中 } \gamma_1 = \frac{|f_{SR}|^2 P_S}{\delta_R^2}。$$

在中继  $R$  处解码  $x_2(t)$  后得到的 SINR 为

$$\gamma_{R,2} = \gamma_1 a_2^2 \quad (3)$$

必须要清楚地认识到,  $\gamma_{R,2}$  只有在  $\gamma_{R,1} > \gamma_{th}$  才能被解码,也就是说只有在中继  $R$  处完美应用 SIC 后,才能将  $x_1(t)$  剔除,  $\gamma_{th}$  为系统所设定的中断门限。

在第二时隙,  $s(t)$  将被分别传输到  $D_1$  和  $D_2$  处,由此在  $D_i$  处得到的接收信号为

$$y_{D_i}(t) = h_{RD_i} \sqrt{P_R} (\xi_1 x_1(t) + \xi_2 x_2(t)) + n_{D_i}(t) \quad (4)$$

式中:  $h_{RD_i}$  表示中继  $R$  和  $D_i$  间的瑞利信道衰落分量;  $P_R$  为在中继  $R$  处的传输功率;  $x_i(t)$  为对应到目标传输用户的接收信号;  $\xi_j (j \in \{1, 2\})$  为在中继  $R$  处的功率分配因子,其满足  $\xi_1 > \xi_2$ , 和  $\xi_1^2 + \xi_2^2 = 1$ ;  $n_{D_i}(t)$  为在  $D_i$  处的高斯白噪声信号,可表示为  $n_{D_i}(t) \sim \mathcal{CN}(0, \delta_{D_i}^2)$ ,  $D_2$  应用 SIC 技术来检测  $x_1(t)$  (将自身的信号  $x_2(t)$  看作噪声)。

利用式(4),在  $D_2$  处为检测  $x_1(t)$  所得到的 SINR 为

$$\gamma_{D_1, D_2} = \frac{\gamma_2 \xi_1^2}{\gamma_2 \xi_2^2 + 1} \quad (5)$$

$$\text{式中 } \gamma_2 = \frac{|h_{RD_2}|^2 P_R}{\delta_{D_2}^2}。$$

应用和中继  $R$  处同样的策略,  $\gamma_{D_1, D_2}$  必须要满足  $\gamma_{D_1, D_2} \geq \gamma_{th}$ 。  $D_2$  从剩余的信号中解码自己的信号,由此解码  $x_2(t)$  的 SINR 为

$$\gamma_{D_2, D_2} = \gamma_2 \xi_2^2 \quad (6)$$

接下来,  $D_1$  将解码  $x_1(t)$  信号,将  $x_2(t)$  当成是噪声,由此在  $D_1$  处解码  $x_1(t)$  的 SINR 为

$$\gamma_{D_1, D_1} = \frac{\gamma_3 \xi_1^2}{\gamma_3 \xi_2^2 + 1} \quad (7)$$

$$\text{式中 } \gamma_3 = \frac{|h_{RD_1}|^2 P_R}{\delta_{D_1}^2}。$$

此外,在  $j$  个窃听用户处的信号为

$$y_{E_j}(t) = h_{RE_j} \sqrt{P_R} (\xi_1 x_1(t) + \xi_2 x_2(t)) + n_{E_j}(t) \quad (8)$$

式中:  $h_{RE_j}$  表示中继  $R$  到第  $j$  个窃听用户处的瑞利信道衰落分量,  $n_{E_j}(t)$  表示在  $j$  个窃听用户处的高斯白噪声信号并且可表示为  $n_{E_j}(t) \sim \mathcal{CN}(0, \delta_{E_j}^2)$ 。

本文假设每一个窃听用户具有多用户检测能力,特别的干扰消除技术 (Parallel interference cancellation, PIC)<sup>[21-22]</sup> 应用到每个窃听用户用来解码传输的信号。由此在  $j$  个窃听用户处用来探测传输到目的端  $D_i$  处的信号窃听 SNR 为

$$\lambda_{D_i E_j} = |h_{RE_j}|^2 P_R \xi_i^2 / \delta_{E_j}^2 = \xi_i^2 \gamma_{D_i E_j} \quad (9)$$

$$\text{式中 } \gamma_{D_i E_j} = |h_{RE_j}|^2 P_R / \delta_{E_j}^2。$$

正如前文介绍,在本文中,考虑联合窃听策略,由此在窃听链路的窃听 SNR 为

$$\gamma_{D_i E} = \sum_{j=1}^N \lambda_{D_i E_j} \quad (10)$$

回顾安全容量的定义式,它定义为主用户信道和窃听信道容量的差值,通过式(5~7、10),则第  $i$  个信号的安全容量为

$$C_{S,\rho} = [C_{B,\rho} - C_{D,E}]^+ \quad \rho \in \{D_1, D_2\} \quad (11)$$

式中:  $[x]^+ \triangleq \max[x, 0]$ ,  $C_{B,\rho} = \log_2(1 + \gamma_{D_i,\rho})$  和  $C_{D,E} = \log_2(1 + \gamma_{D,E})$ ,  $C_{B,\rho}$  表示在用户  $\rho$  处检测第  $i$  个信号的安全容量。

## 2 性能分析

本节将会分析本文提出模型的安全中断概率,在最开始将会给出本文所用到的两种信道模型的统计特性。

### 2.1 信道模型

#### 2.1.1 地面信道模型

正如前文所述,在本文所考虑的模型中,地面网络信道的衰落模型为瑞利衰落,由此可得到  $\gamma_U (U \in \{2, 3, D_i E_j\})$  的概率密度函数 (Probability density function, PDF) 和累积分布函数 (Cumulative distribution function, CDF) 分别为

$$f_{\gamma_U} = \frac{1}{\bar{\gamma}_U} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_U}} \quad (12)$$

$$F_{\gamma_U} = 1 - e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_U}} \quad (13)$$

式中  $\bar{\gamma}_U$  为平均信道增益。

### 2.1.2 卫星信道模型

根据文献[6],本文假设卫星信道服从SR分布,信道参数 $m_1$ 为整数,则 $\gamma_1$ 的CDF为

$$f_{\gamma_1}(x) = \sum_{k_1=0}^{m_1-1} \frac{\alpha_1(1-m_1)_{k_1}(-\delta_1)^{k_1}x^{k_1}}{(k_1!)^2\bar{\gamma}_1^{k_1+1}\exp(\Delta_1x)} \quad (14)$$

式中: $\bar{\gamma}_1$ 表示用户S到中继R处的平均SNR,其中

$$\alpha_1 = \left( \frac{2b_1m_1}{2b_1m_1 + \Omega_1} \right)^{m_1} / 2b_1, \quad \beta_1 = \frac{1}{2b_1}, \quad \delta_1 =$$

$\frac{\Omega_1}{2b_1(2b_1m_1 + \Omega_1)}, m_1 \geq 0, 2b_1, \Omega_1$ 分别表示衰落参数、多径分量的凭据功率和直达径的平均功率,

$$\Delta = \frac{\beta - \delta}{\bar{\gamma}_1}, (\cdot)_k \text{表示 Prochhammer 符号}^{[23]}。$$

### 2.2 安全中断概率

安全中断概率定义为非零安全传输速率小于特定中断门限的概率,对于本文而言,中断概率可表示为

$$P_{\text{out}}(\gamma_0) = P_{\text{out}1}(\gamma_0) + P_{\text{out}2D_2}(\gamma_0) - P_{\text{out}1}(\gamma_0)P_{\text{out}2D_2}(\gamma_0) \quad (15)$$

式中

$$P_{\text{out}1}(\gamma_0) = P_{\text{out}1D_1}(\gamma_0) + P_{\text{out}1D_2}(\gamma_0) - P_{\text{out}1D_1}(\gamma_0)P_{\text{out}1D_2}(\gamma_0) \quad (16)$$

$$P_{\text{out}2D_2}(\gamma_0) = P_{12D_2}(\gamma_0) + P_{22D_2}(\gamma_0) - P_{12D_2}(\gamma_0)P_{22D_2}(\gamma_0) \quad (17)$$

$$P_{\text{out}1\rho}(\gamma_0) = 1 - [1 - P_{11\rho}(\gamma_0)][1 - P_{21\rho}(\gamma_0)] \quad (18)$$

$$P_{1i\rho}(\gamma_0) = Pr(\gamma_{R,i} \leq \gamma_0) \quad (19)$$

$$P_{2i\rho}(\gamma_0) = Pr(C_{S_i} \leq C_0) = \int_0^\infty \int_0^{\gamma_0+y(1+\gamma_0)} f_{\gamma_{D_i\rho}}(x) f_{\gamma_{D_iE}}(y) dx dy \quad (20)$$

且 $C_0 = \log_2(1 + \gamma_0)$ 。

在式(18)中,无论第一传输链路还是第二传输链路的信号质量小于所设定的中断门限都会引起系统的中断。在接下来,为了简化分析过程,假设 $\bar{\gamma}_{D_1E} = \bar{\gamma}_{D_2E} = \bar{\gamma}_E$ ,则在 $D_1$ 和 $D_2$ 处的安全中断概率如定理1所示。

**定理1** 在 $D_1$ 处,检测 $x_1(t)$ 的安全中断概率 $P_{\text{out}1}$ 为

$$P_{\text{out}1D_1}(\gamma_0) = P_{11D_1}(\gamma_0) + P_{21D_1}(\gamma_0) - P_{11D_1}(\gamma_0)P_{21D_1}(\gamma_0)$$

其中

$$P_{11D_1}(\gamma_0) = 1 - \sum_{k_1=0}^{m_1-1} \sum_{t=0}^{k_1} \frac{\alpha_1(1-m_1)_{k_1}(-\delta_1)^{k_1}}{k_1!(\bar{\gamma}_1)^{k_1+1}t!\Delta_1^{k_1-t+1}} \left( \frac{\gamma_0}{a_1^2 - a_2^2\gamma_0} \right)^t e^{-\frac{\Delta_1\gamma_0}{a_1^2 - a_2^2\gamma_0}} \quad (21)$$

$$P_{21D_1}(\gamma_0) = 1 - \frac{\bar{\gamma}_E^{-N}}{(N-1)!\xi_1^{2N}} I_1 \quad (22)$$

式中

$$I_1 = \frac{A}{2B} \sum_{i=1}^K \omega_i z_i^{K-1} e^{-\frac{Az_i}{2B\bar{\gamma}_E\xi_1^2}} e^{-\frac{2\gamma_0 + Az_i(1+\gamma_0)/B}{2A - Az_i}} \quad (23)$$

式中: $K$ 为级数的个数, $A = (\xi_1^2 - \xi_2^2\gamma_0)\bar{\gamma}_3$ , $B = \xi_2^2(1 + \gamma_0)\bar{\gamma}_3$ ,且 $z_i = t_i + 1$ 表示 Legendre polynomials 函数的第 $i$ 个零值解<sup>[24]</sup>, $\omega_i$ 为权值<sup>[24]</sup>。

应用同样方法,在 $D_2$ 处,检测 $x_1(t)$ 信号的安全中断概率 $P_{\text{out}1D_2}$ 为

$$P_{\text{out}1D_2}(\gamma_0) = P_{11D_2}(\gamma_0) + P_{21D_2}(\gamma_0) - P_{11D_2}(\gamma_0)P_{21D_2}(\gamma_0) \quad (24)$$

式中

$$\begin{cases} P_{11D_2}(\gamma_0) = P_{11D_1}(\gamma_0) \\ P_{21D_2}(\gamma_0) = 1 - \frac{\bar{\gamma}_E^{-N}}{(N-1)!\xi_1^{2N}} I_1 D_2 \end{cases} \quad (25)$$

$$I_1 D_2 = \frac{A_1}{2B_1} \sum_{i=1}^K \omega_i z_i^{K-1} e^{-\frac{A_1 z_i}{2B_1\bar{\gamma}_E\xi_1^2}} e^{-\frac{2\gamma_0 + A_1 z_i(1+\gamma_0)/B_1}{2A_1 - A_1 z_i}} \quad (26)$$

$$A_1 = (\xi_1^2 - \xi_2^2\gamma_0)/\bar{\gamma}_2, B_1 = \xi_2^2(1 + \gamma_0)/\bar{\gamma}_2$$

**证明** 详见附录A。

**定理2** 由于 $x_2(t)$ 只在 $D_2$ 处被检测,所以在 $D_2$ 处检测 $x_2(t)$ 的中断概率为

$$P_{\text{out}2D_2}(\gamma_0) = P_{12D_2}(\gamma_0) + P_{22D_2}(\gamma_0) - P_{12D_2}(\gamma_0)P_{22D_2}(\gamma_0)$$

其中

$$P_{12D_2}(\gamma_0) = 1 - \sum_{k_2=0}^{m_1-1} \sum_{t=0}^{k_2} \frac{\alpha_1(1-m_1)_{k_2}(-\delta_1)^{k_2}}{k_2!(\bar{\gamma}_1)^{k_2+1}t!\Delta_1^{k_2-t+1}} \left( \frac{\gamma_0}{a_2^2} \right)^t e^{-\frac{\Delta_1\gamma_0}{a_2^2}} \quad (27)$$

$$P_{22D_2}(\gamma_0) = 1 - \frac{\bar{\gamma}_E^{-N}}{\xi_2^{2N}\bar{\gamma}_2} \left( \frac{1+\gamma_0}{\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{\xi_2^2\bar{\gamma}_E} \right)^{-N} \quad (28)$$

**证明** 详见附录B。

### 2.3 安全中断概率渐进解

当 $\bar{\gamma}_U$ 增长到足够大时,式(13)变为

$$F_{\gamma_U}(x) \approx \frac{x}{\bar{\gamma}_U} + o(x) \quad (29)$$

式中 $o(x)$ 表示 $x$ 的高阶无穷小。

利用同样的方法,回顾式(14),当 $\bar{\gamma}_1$ 增加到足够大时,式(14)为

$$F_{\gamma_1}(x) \approx \frac{\alpha_1}{\bar{\gamma}_1} x + o(x) \quad (30)$$

**定理3** 在 $D_1$ 处检测信号 $x_1(t)$ 的安全中断概率为



$$P_{\text{out}1D_1}^{\infty}(\gamma_0) = 1 - \frac{\alpha_1 \gamma_0}{\bar{\gamma}_1 (a_1^2 - a_2^2 \gamma_0)} + \frac{\bar{\gamma}_E^{-N}}{(N-1)! \xi_1^{2N}} \times \frac{A}{2B\bar{\gamma}_3} \sum_{i=1}^K \frac{\omega_i z_i^{K-1} e^{-\frac{A z_i}{2B\bar{\gamma}_E \xi_1^2}} (2\gamma_0 + A z_i (1 + \gamma_0)/B)}{2A - A z_i} \quad (31)$$

在  $D_2$  处检测信号  $x_1(t)$  的安全中断概率为

$$P_{\text{out}1D_2}^{\infty}(\gamma_0) = 1 - \frac{\alpha_1 \gamma_0}{\bar{\gamma}_1 (a_1^2 - a_2^2 \gamma_0)} + \frac{\bar{\gamma}_E^{-N}}{(N-1)! \xi_1^{2N}} \times \frac{A_1}{2BA_1\bar{\gamma}_3} \sum_{i=1}^K \frac{\omega_i z_i^{K-1} (2\gamma_0 + A_1 z_i (1 + \gamma_0)/B_1)}{e^{\frac{A_1 z_i}{2B_1\bar{\gamma}_E \xi_1^2}} (2A_1 - A_1 z_i)} \quad (32)$$

由于  $x_2(t)$  只在  $D_2$  处被检测, 所以其在  $D_2$  处的安全中断概率为

$$P_{\text{out}2D_2}^{\infty}(\gamma_0) = 1 - \frac{\alpha_1 \gamma_0}{\bar{\gamma}_1 a_2^2} + \frac{1}{\bar{\gamma}_2} [\gamma_0 + (1 + \gamma_0) N \bar{\gamma}_E \xi_1^2] \quad (33)$$

**证明** 首先将式(13)和式(14)代入式(29)和式(30)中, 最后利用附录A和附录B原理, 得到渐进分析。证毕。

在这种情况下, 本文得到了安全分集增益和安全编码增益, 假设  $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_3 = \bar{\gamma}$ , 式(18)可改写为

$$P_{\text{out}}^{\infty}(\gamma_0) \approx G_d \left( \frac{1}{\bar{\gamma}} \right)^{G_d} \quad (34)$$

式中:  $G_d = 1$  为安全分集增益<sup>[6]</sup>, 安全编码增益为

$$G_a = \frac{2\alpha_1 \gamma_0}{(a_1^2 - a_2^2 \gamma_0)} + \frac{\alpha_1 \gamma_0}{a_2^2 \bar{\gamma}_1} - [\gamma_0 + (1 + \gamma_0) N \bar{\gamma}_E \xi_1^2] - \left[ \frac{A}{2B} \sum_{i=1}^K \frac{\omega_i z_i^{K-1} e^{-\frac{A z_i}{2B\bar{\gamma}_E \xi_1^2}} (2\gamma_0 + A z_i (1 + \gamma_0)/B)}{(N-1)! \xi_1^{2N-2} \bar{\gamma}_E^N (2A - A z_i)} \right] - \left[ \frac{A_1}{2B_1} \sum_{i=1}^K \frac{\omega_i z_i^{K-1} e^{-\frac{A_1 z_i}{2B_1\bar{\gamma}_E \xi_1^2}} (2\gamma_0 + A_1 z_i (1 + \gamma_0)/B_1)}{(N-1)! \xi_1^{2N-2} \bar{\gamma}_E^N (2A_1 - A_1 z_i)} \right] \quad (35)$$

### 3 仿真校验

在本节中, 蒙特拉罗仿真用来证明理论分析的正确性, 仿真软件为 Matlab。同时假设  $K=8$ , 并且  $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_3 = \bar{\gamma}$ 。系统的信道参数在表1<sup>[8]</sup>中给出。不同的功率分配方案为

Scene 1:  $a_1^2 = \xi_1^2 = 0.9, a_2^2 = \xi_2^2 = 0.1$ ;

Scene 2:  $a_1^2 = \xi_1^2 = 0.8, a_2^2 = \xi_2^2 = 0.2$ ;

Scene 3:  $a_1^2 = \xi_1^2 = 0.7, a_2^2 = \xi_2^2 = 0.3$ 。

表1 信道参数

Table 1 Channel parameters			
衰落情况	$m_1$	$b_1$	$\Omega_1$
重衰落 FHS	1	0.063	0.000 7
一般衰落 AS	5	0.251	0.279
重度衰落 ILS	10	0.158	1.29

图2表示不同衰落情况下的系统安全中断概率, 仿真条件为:  $\gamma_0 = 0$  dB 且  $N=2$ 。从图2中可看出, 仿真值和理论值贴合紧密, 这表明本文理论分析的正确性。同时可看到当  $\bar{\gamma}$  变大时, 安全中断概率将会变为常数, 这是由硬件损伤和 NOMA 系统的特性所导致。从图2中还可看出, 当  $\gamma_E$  增加时, 由于窃听者的窃听能力增强, 系统的安全中断概率会变大。同时信道衰落变大, 系统的安全中断概率将会变大。

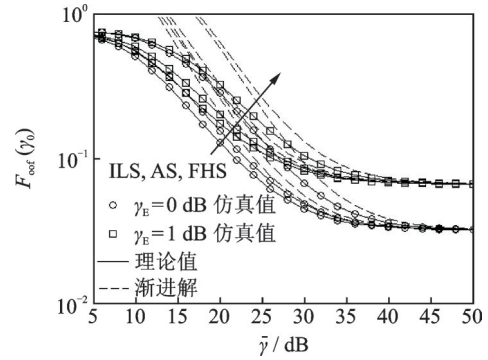


图2 不同衰落情况下的系统安全中断概率

Fig.2 SOP versus  $\bar{\gamma}$  and  $\gamma_E$  for Scene 1 with  $\gamma_0 = 0$  dB and  $N = 2$  under different shadowing fading

图3表示不同的窃听用户数量和中断门限对于系统安全中断概率的影响, 仿真条件为: Scene 1, ILS 衰落。从图3可知, 当窃听用户数目增大时, 由于有更多的窃听者用来窃听信号, 因此安全中断概率会变大。同时类似于图2, 当  $\bar{\gamma}$  足够大时, 系统的安全中断概率将会变为常数。

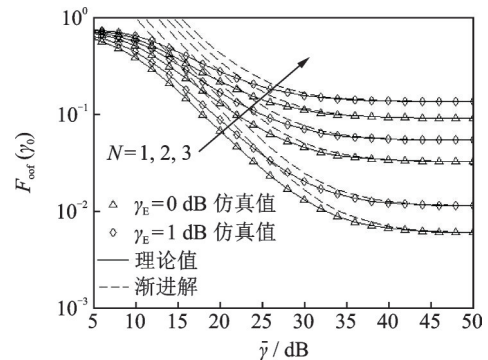


图3 不同的窃听用户数量和中断门限下的系统安全中断概率

Fig.3 SOP versus  $\bar{\gamma}$ ,  $N$  and  $\gamma_0$  for Scene 1 under ILS

图4表示不同功率分配参数情况下的系统安全中断概率,仿真条件为: $\gamma_E = 0$  dB, ILS衰落。从图4中可得,当功率分配的间隔增大时,系统的安全中断概率将会变小,这是由于相对弱的通信用户被很好地保护起来以致拥有更好的安全性能。

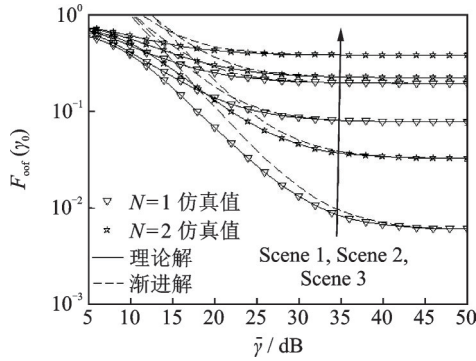


图4 不同功率分配参数情况下系统安全中断概率  
Fig.4 SOP versus  $\bar{\gamma}$ ,  $N$  and scenes with  $\gamma_E = 0$  dB and  $\gamma_0 = 0$  dB under ILS

## 4 结 论

本文研究了基于NOMA的星地融合网络的安全性能。进一步,本文推导得到了联合窃听策略下的安全中断概率的闭式表达式。更进一步,给出了高信噪比下安全中断概率的渐进表达式。此外,还推导出了安全分集增益和安全编码增益,所得结果为评估NOMA方案对所考虑的安全性能的影响提供了有效的方法。另外,当系统的信道受到轻衰落时,系统的安全性能得到了提高。

## 附录

### 附录 A

回顾式(18),得到 $P_{\text{out}1D_1}$ 关键的步骤是得到 $P_{1D_1}(\gamma_0)$ 和 $P_{2D_1}(\gamma_0)$ 的表达式,下面将给出求出这两个关键部分的推导步骤。

利用式(19)和式(2),式(19)为

$$P_{1D_1}(\gamma_0) = Pr(\gamma_{R,1} \leq \gamma_0) =$$

$$Pr\left(\gamma_1 \leq \frac{\gamma_0}{a_1^2 - a_2^2 \gamma_0}\right) = F_{\gamma_1}\left(\frac{\gamma_0}{a_1^2 - a_2^2 \gamma_0}\right) \quad (\text{A1})$$

利用式(20)并经过简单的计算步骤可得

$$P_{2D_1}(\gamma_0) = \int_0^{A/B} F_{\gamma_{D_1,D_1}}(\gamma_0 + y(1 + \gamma_0)) \cdot f_{\gamma_{D_1,E}}(y) dy + \int_{A/B}^{\infty} f_{\gamma_{D_1,E}}(y) dy \quad (\text{A2})$$

式(A2)中,最关键的步骤是得到 $\gamma_{D_1,D_1}$ 的CDF和 $\gamma_{D_1,E}$ 的PDF。

通过式(7)和式(13), $\gamma_{D_1,D_1}$ 的CDF为

$$F_{\gamma_{D_1,D_1}}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_3(\xi_1^2 - \xi_2^2 x)}} \quad (\text{A3})$$

利用式(6,10,12),以及文献[23],可得 $\gamma_{D_1,E}$ 的PDF为

$$f_{\gamma_{D_1,E}}(x) = \frac{\bar{\gamma}_E^{-N}}{(N-1)! \xi_1^{2N}} x^{N-1} e^{-\frac{x}{\xi_1^2 \bar{\gamma}_E}} \quad (\text{A4})$$

将式(A3)和式(A4)代入式(A2)中,可得

$$P_{2D_1}(\gamma_0) = 1 - \frac{\bar{\gamma}_E^{-N}}{(N-1)! \xi_1^{2N}} \times \left[ \int_0^{A/B} \underbrace{\exp\left(-\frac{\gamma_0 + y(1 + \gamma_0)}{A - By}\right)}_{I_1} e^{-\frac{y}{\xi_1^2 \bar{\gamma}_E}} y^{1-N} dy + \int_{A/B}^{\infty} e^{-\frac{y}{\xi_1^2 \bar{\gamma}_E}} y^{1-N} dy \right] \quad (\text{A5})$$

然而 $I_1$ 的闭式解很难得到。所以借助于文献[24]的帮助,并且利用高斯切比雪夫等式, $I_1$ 可得式(23)的结果。将式(23)代入式(22)中,并且经过必要的数学计算,可得 $P_{2D_1}(\gamma_0)$ 。同样的方法,可得 $P_{2D_2}(\gamma_0)$ 。证毕。

### 附录 B

借助于式(6)和式(13), $\gamma_{D_2,D_2}$ 的CDF为

$$F_{\gamma_{D_2,D_2}}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\bar{\gamma}_2 \xi_2^2}\right) \quad (\text{B1})$$

利用式(3)和式(14),可得 $P_{1D_2}(\gamma_0)$ 的闭式解。然后将式(B1)和式(A4)代入式(20)中,可得 $P_{2D_2}(\gamma_0)$ 。

### 参考文献:

- [1] GUO K F, LIN M, ZHANG B N, et al. Performance analysis of hybrid satellite-terrestrial cooperative networks with relay selection[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2020, 69(8): 9053-9067.
- [2] GUO K F, AN K, ZHANG B N, et al. Physical layer security for multiuser satellite communication systems with threshold-based scheduling scheme[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2020, 69(5): 5129-5141.
- [3] AN K, LIANG T, ZHENG G, et al. Performance limits of cognitive FSS and terrestrial FS for Ka-band [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(5): 2604-2611.
- [4] LU W X, AN K, LIANG T, et al. Robust beamforming design for sum secrecy rate maximization in multibeam satellite systems[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(3): 1568-1572.
- [5] JO K Y. Satellite communications network design and analysis[M]. USA: Artech House Norwood, MA, 2011.
- [6] GUO K F, LIN M, ZHANG B N, et al. On the performance of LMS communication with hardware impairments and interference[J]. IEEE Trans Commun, 2019, 67(2): 1490-1505.
- [7] AN K F, LIANG T. Hybrid satellite-terrestrial relay networks with adaptive transmission[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2019, 68(12): 12448-12452.
- [8] GUO K F, AN K, ZHANG B N, et al. On the performance of the uplink satellite multiterrestrial relay

- networks with hardware impairments and interference [J]. *IEEE Syst J*, 2019, 13(3): 2297-2308.
- [9] AN K, LIN M, ZHU W, et al. Outage performance of cognitive hybrid satellite terrestrial networks with interference constraint[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2016, 65(11): 9397-9404.
- [10] GUO K F, AN K, ZHANG B N, et al. Outage analysis of cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with hardware impairments and multi-primary users[J]. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2018, 7(5): 816-819.
- [11] SULTANGALI A, THEODOROS A T, GALYMZHAN N, et al. Outage performance of underlay CR-NOMA networks with detect-and-forward relaying [C]//*Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2018.
- [12] ISLAM S M, ZENG M, DOBRE O A, et al. Resource allocation for downlink NOMA systems: Key techniques and open issues[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2018, 25(2): 40-47.
- [13] TANG X G, AN K, GUO K F, et al. On the performance of two-way multiple relay non-orthogonal multiple access based networks with hardware impairments[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 128896-128909.
- [14] DING Z G, LEI X F, KARAGIANNIDIS G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends[J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2017, 35(10): 2181-2195.
- [15] DING Z G, PENG M, POOR H V, et al. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. *IEEE Commun Lett*, 2015, 19(8): 1462-1465.
- [16] ZHANG Y, WANG H M, YANG Q, et al. Secrecy sum rate maximization in non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Commun Lett*, 2016, 20(5): 930-933.
- [17] LEI H J, ZHANG J, PARK K, et al. Secrecy outage of max-min TAS scheme in MIMONOMA systems [J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67(8): 6981-6990.
- [18] WANG Z L, PENG Z Y. Secrecy performance analysis of relay selection in cooperative NOMA systems[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 86274-86387.
- [19] CHENG J, YANG L, ALOUINI M S, et al. Physical layer security for cooperative NOMA systems [J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67(5): 4645-4649.
- [20] YIN Z S, JIA M, WANG W, et al. Secrecy rate analysis of satellite communications with frequency domain NOMA[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68(12): 11847-11858.
- [21] QIN Z, LIU Y, DING Z G, et al. Physical layer security for 5G non-orthogonal multiple access in large-scale networks[C]//*Proceedings of Int Commun Conf. [S.l.]*: IEEE, 2016.
- [22] LIU Y, QIN Z, ELKASHLAN M, et al. Enhancing the physical layer security of non-orthogonal multiple access in large-scale networks[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2017, 16(3): 1656-1672.
- [23] GRADSHTEYN I S, YZHIK I M. *Table of integrals, series and products*[M]. 7th ed. USA: [s. n.], 2007.
- [24] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical TABLES*[M]. 9th ed. New York, NY, USA: Dover, 1972.

(编辑:夏道家)