

文章编号:1007-5321(2022)06-0127-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2022-082

认知 NOMA 系统中基于 RIS 的 V2V 物理层安全性能

李美玲¹, 刘畅¹, 杨晓霞¹, 薛凯轩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: 车联网通信信道环境复杂, 动态变化大, 使网络的安全性能无法得到准确评估。对此, 利用第 6 代移动通信系统的可重构智能表面 (RIS) 技术, 辅助认知非正交多址接入 (NOMA) 车联网通信架构, 分析了物理层安全性能, 推导了双瑞利衰落信道下的中断概率和截获概率解析表达式, 并通过蒙特卡洛仿真实验进行了验证。实验结果表明, 对源车辆发射功率、车辆间距离、智能反射面反射单元数量和目标速率等参数进行优化能够提升车-车 (V2V) 网络的物理层安全性能。

关键词: 车-车网络; 智能反射面; 认知非正交多址接入; 物理层安全

中图分类号: TN929.538

文献标志码: A

Physical Layer Security for RIS-Based Cognitive NOMA V2V Network

LI Meiling¹, LIU Chang¹, YANG Xiaoxia¹, XUE Kaixuan¹, LU Zhaoming²

(1. School of Electronic 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: The complex and highly dynamic environment of the communication channel of the Internet of vehicles makes it impossible to accurately measure the network security performance. Aiming at the Internet of vehicles communication architecture based on cognitive non-orthogonal multiple access (NOMA) assisted by the sixth generation of mobile communications system reconfigurable intelligence surface (RIS) technology, the physical layer security performance is analyzed. The analytical expressions of outage probability and intercept probability under double Rayleigh fading channels are derived. Finally, Monte Carlo simulation is used to validate the theoretical analysis. The results show that the physical layer security performance of vehicle to vehicle (V2V) network can be further improved by optimizing the source vehicle transmitting power, distance between vehicles, RIS reflection unit number, and target rate.

Key words: vehicle to vehicle network; intelligent reflecting surface; cognitive non-orthogonal multiple access; physical layer security

非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 系统和认知无线电 (CR, cognitive

radio) 技术是提高频谱效率的重要手段。现有研究表明, CR 与 NOMA 系统相结合的方案在车-车

收稿日期: 2022-04-13

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项目 (2021-133); 太原科技大学研究生优秀创新项目 (XCX212022)

作者简介: 李美玲 (1982—), 女, 教授, 博士生导师, 邮箱: meilingli@tyust.edu.cn。

(V2V, vehicle to vehicle)网络中的应用具有重要意义。李美玲等^[1]针对协作 CR-NOMA 系统的车联网,基于保密中断概率分析了主用户的物理层安全性能。此外,一些学者也从不同角度对 CR 与 NOMA 相结合的效果进行了分析^[2,4]。另一方面,信息的安全传输是 V2V 网络通信中的关键。传统密钥分发技术需要大量的通信开销,而物理层安全(PLS, physical layer security)技术具有更低的复杂性和网络开销,更适用于 V2V 网络通信领域^[5]。可重构智能表面(RIS, reconfigurable intelligence surface)技术开启了新的通信模式,提高了第6代移动通信系统的能量和频谱效率^[6-8]。Niu 等^[9]研究了 RIS 无线携能通信网络的保密性能,Chen 等^[10]考虑了残留硬件损耗对 RIS 辅助 NOMA 系统物理层安全性能的影响。此外,Luo 等^[11]从 V2V 网络体系结构的角度总结了 V2V 网络面临的主要安全威胁。Makarfi 等^[12]的研究表明,V2V 网络的安全性可通过增加 RIS 反射单元数量得到提升。

目前,少有学者针对认知 NOMA 系统中 RIS 辅助 V2V 网络的物理层安全性能进行研究。笔者构建了下行 CR-NOMA 系统中 RIS 辅助的 V2V 网络通信系统模型,从可靠性和安全性的角度分析了系统性能。推导了双瑞利衰落信道中系统中断概率和截获概率的闭合表达式,并通过蒙特卡洛仿真结果验证了理论分析的正确性。仿真结果表明,系统的安全性可与可靠性之间存在折中,能够通过增加 RIS 反射单元的数量进行优化;通过对源车辆发射功率、车辆间距离、RIS 反射单元数量和目标速率等方面进行优化,能够提升 V2V 网络的物理层安全性能。

1 系统模型

笔者提出的下行 CR-NOMA 系统 RIS 辅助的 V2V 网络通信模型如图 1 所示。该模型由主网络和认知网络构成,其中认知网络包括一辆信息源车辆 V_s 、2 辆与 V_s 距离不同的 NOMA 车辆 V_1 、 V_2 和一辆窃听车辆 V_e 。在图 1 所示的通信场景中, V_s 向 V_1 和 V_2 发送保密信息, V_e 试图接收和解码加密信息。主网络包括主发射机(PT, primary transmitter)和主要目的节点(PD, primary destination)。已知 V_1 、 V_2 和 V_e 位于距离 V_s 的一定半径内,信息传输期间 V2V 网络链路精确的相对距离未知^[12]。在 V_s 上搭载配

置 N 个反射单元的 RIS,形成一个接入点(AP, access point)进行通信,RIS 通过有线链路或光纤与 V_s 连接^[12],同时智能地改变反射元件的相移,使接收信干噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio)最大化。假设在系统中所有节点均配置单天线,并且认为 PT 与接收车辆的信道增益服从瑞利衰落,所有车辆间的通信信道增益服从独立双瑞利衰落。其中, $h_{t,m}, m \in \{1, 2, e, d, s\}$ 分别为链路 PT $\rightarrow V_1$, PT $\rightarrow V_2$, PT $\rightarrow V_e$, PT \rightarrow PD, PT $\rightarrow V_s$ 的信道系数, $h_{n,m}, m \in \{1, 2, e, d\}, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 分别表示 RIS 的第 n 个反射单元与 V_1 、 V_2 、 V_e 和 PD 间的信道系数。下面分别对系统的信号模型和信道统计进行分析。

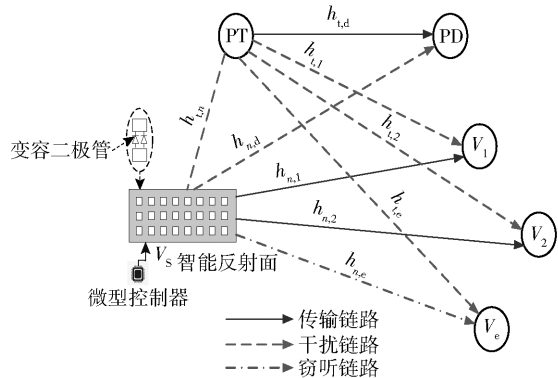


图1 下行 CR-NOMA 系统 RIS 辅助的 V2V 通信模型

1.1 信号模型

如图 1 所示, V_s 向 V_1 、 V_2 发送 NOMA 复合信号 $x_1 \sqrt{\alpha_1 P_s} + x_2 \sqrt{\alpha_2 P_s}$,其中 P_s 为 V_s 的发射功率, x_1 和 x_2 分别为 V_1 和 V_2 的信号,且 $E[|x_1|^2] = E[|x_2|^2] = 1$, α_1 和 α_2 分别为 x_1 和 x_2 的功率分配系数,且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_2 > \alpha_1$ 。由于 V_s 以广播形式发送 NOMA 信号, V_e 很容易窃听该信号。当授权频谱被占用时,主网络将对认知网络的传输产生干扰,且干扰系数为 η , $0 \leq \eta \leq 1$ 。所以,车辆 V_1 、 V_2 和 V_e 接收到的信号为

$$y_i = h_{t,i} x_t \sqrt{\Omega \eta P_t} + \sum_{n=1}^N h_{n,i} |\lambda_n| e^{-j\theta_n} (x_1 \sqrt{\alpha_1 P_s} + x_2 \sqrt{\alpha_2 P_s}) + \omega_i \quad (1)$$

其中, $i \in \{1, 2, e\}$; P_t 为 PT 的发射功率; x_t 为 PT 的信号,且 $E[|x_t|^2] = 1$; ω_i 为接收端接收到的加性高斯白噪声; $h_{t,i} = g_{t,i} \sqrt{r_{t,i}^{-\beta}}$,分别为链路 PT $\rightarrow V_1$, PT $\rightarrow V_2$ 和 PT $\rightarrow V_e$ 的信道系数, $r_{t,i}$ 分别为 PT 与 V_1 、 V_2 、 V_e 间的距离, β 为路径损耗指数, $g_{t,i}$ 分别为链路 PT \rightarrow

$V_1, \text{PT} \rightarrow V_2$ 和 $\text{PT} \rightarrow V_e$ 单位距离的信道增益; $h_{n,i} = g_{n,i} \sqrt{r_i^{-\beta}}$ 为 RIS 第 n 个反射单元与 V_1, V_2 和 V_e 间的信道系数, r_i 为 V_s 与 V_1, V_2, V_e 间的距离, $g_{n,i}$ 为 RIS 第 n 个反射单元与 V_1, V_2, V_e 间单位距离的信道增益; $|\lambda_n|$ 为 RIS 第 n 个反射单元的反射增益, 并设其等于 1; θ_n 为 RIS 第 n 个反射单元的相位, 通过相位匹配, 接收信号的 SINR 能够实现最大化; $\Omega = 0/1$ 表示授权频谱未被 PD 占用/被 PD 占用。令 $A_i = \sum_{n=1}^N g_{n,i}$, 根据 NOMA 的串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation), V_2 能够解码信号 x_2 , V_1 和 V_e 能够先解码信号 x_2 再解码信号 x_1 , 因此, V_i 接收到的 SINR 为

$$\gamma_i^{x_2} = \frac{\alpha_2 P_s A_i^2 r_i^{-\beta}}{\Omega \eta P_t |g_{t,i}|^2 r_{t,i}^{-\beta} + \alpha_1 P_s A_i^2 r_i^{-\beta} + W} \quad (2)$$

其中 W 为接收端加性高斯白噪声的噪声功率。

$$\gamma_i^{x_1} = \frac{\alpha_1 P_s A_i^2 r_i^{-\beta}}{\Omega \eta P_t |g_{t,i}|^2 r_{t,i}^{-\beta} + W} \quad (3)$$

1.2 信道统计特性

由于 PT 与接收车辆的信道增益服从瑞利衰落, 所以随机变量 $X_i = |g_{t,i}|^2$ 的概率密度函数 (PDF, probability density function) 和累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function) 分别为

$$f_{X_i}(x) = \frac{\exp\left(-\frac{x}{l_{X_i}}\right)}{l_{X_i}} \quad (4)$$

$$F_{X_i}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{l_{X_i}}\right) \quad (5)$$

由于车辆具有移动特性, 传统瑞利衰落信道不足以模拟 V2V 网络通信链路的衰落特性, 考虑到所有车辆间的通信信道增益服从独立双瑞利衰落, 可得随机变量 $Y_i = A_i^2$ 的 PDF 和 CDF, 即^[13]

$$\left. \begin{aligned} f_{Y_i}(y) &= \frac{y^{(a-1)/2}}{2b^{a+1} G(a+1)} \exp\left(-\frac{\sqrt{y}}{b}\right) \\ F_{Y_i}(y) &= \frac{g\left(a+1, \frac{\sqrt{y}}{b}\right)}{G(a+1)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中: $a = \frac{k_1^2}{k_2^2} - 1, k_1 = \frac{N\pi}{2}, k_2 = 4N \left(1 - \frac{\pi^2}{16}\right); b = \frac{k_2}{k_1}$ 。

2 中断性能分析

2.1 远用户车辆 V_2 的中断概率

由于 V_1 和 V_2 是通过基于机会接入的方式使用

授权频谱进行通信, 只有当认知网络检测到频谱空闲时才接入频谱, 用 \hat{H} 表示认知网络检测到的频谱占用情况, V_2 发生中断的概率为

$$O_{\text{out},2} = c \underbrace{\Pr(\gamma_2^{x_2} \leq \gamma_{\text{th},2} | H_0, \hat{H} = H_0)}_{O_{\text{out},2}^1} + d \underbrace{\Pr(\gamma_2^{x_2} \leq \gamma_{\text{th},2} | H_1, \hat{H} = H_0)}_{O_{\text{out},2}^2} \quad (7)$$

其中: $\gamma_{\text{th},2} = 2^{R_2} - 1$ 为 V_2 的保密 SINR 阈值, R_2 为解码 x_2 的目标速率;

$$c = \frac{O_0(1 - O_f)}{O_0(1 - O_f) + (1 - O_0)(1 - O_d)}$$

O_0 为 $\hat{H} = H_0$ 时的概率, O_d 为正确检测频谱占用的概率, O_f 为虚警率, 即实际频谱未被占用但认知网络检测到频谱被占用的概率;

$$d = \frac{(1 - O_0)(1 - O_d)}{O_0(1 - O_f) + (1 - O_0)(1 - O_d)}$$

利用式(6)分别对 $O_{\text{out},2}^1$ 和 $O_{\text{out},2}^2$ 进行计算, 可以得到式(8)和式(9)。

$$O_{\text{out},2}^1 = \begin{cases} 1, & \frac{1}{1 + \gamma_{\text{th},2}} < \alpha_1 < 1 \\ \frac{\gamma\left(a+1, \frac{1}{b} \sqrt{\psi_{\text{out},2}}\right)}{\Gamma(a+1)}, & 0 < \alpha_1 \leq \frac{1}{1 + \gamma_{\text{th},2}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} O_{\text{out},2}^2 &= \frac{\gamma\left(a+1, \frac{1}{b} \sqrt{\psi_{\text{out},2}}\right)}{\Gamma(a+1)} + \frac{\exp(\tau_{\text{out},2})}{b^{a+1}} \times \\ &\left(\frac{\mathcal{E}_{\text{out},2}}{2}\right)^{\frac{a+1}{2}} \exp\left(\frac{\mathcal{E}_{\text{out},2}}{8b^2}\right) D_{-(a+1)}\left(\frac{1}{b} \sqrt{\frac{\mathcal{E}_{\text{out},2}}{2}}\right) - \\ &\exp(\tau_{\text{out},2}) \frac{\psi_{\text{out},2} \pi}{2L} \sum_{l=1}^L \frac{\sqrt{1 - \phi_l^2}}{2b^{a+1} \Gamma(a+1)} \times \\ &\left(\sqrt{\frac{\psi_{\text{out},2}(\phi_l + 1)}{2}}\right)^{a-1} \exp\left(-\frac{\tau_{\text{out},2}(\phi_l + 1)}{2} - \right. \\ &\left. \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\psi_{\text{out},2}(\phi_l + 1)}{2}}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $D(\cdot)$ 为 Parabolic Cylinder 函数,

$$\psi_{\text{out},2} = \frac{W \gamma_{\text{th},2}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \gamma_{\text{th},2}) P_s r_2^{-\beta}}$$

$$\tau_{\text{out},2} = \frac{W}{\eta P_t r_{t,2}^{-\beta} \lambda_{g_{t,2}}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{out},2} = \frac{\eta P_t r_{t,2}^{-\beta} \gamma_{\text{th},2} \lambda_{g_{t,2}}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \gamma_{\text{th},2}) P_s r_2^{-\beta}}$$

$$\phi_l = \cos\left(\frac{2l-1}{2L} \pi\right)$$

将式(8)、式(9)代入式(7)可得 V_2 的中断概率。

2.2 近用户车辆 V_1 的中断概率

V_1 成功解码信号 x_1 需同时满足 2 个条件:

① V_1 成功解码 x_2 并使用 SIC 技术消除 x_2 ; ② V_1 成功解码 x_1 。只要有一个条件不满足时 V_1 的通信发生中断。为方便计算,利用反式解可得 V_1 的中断概率,即

$$O_{\text{out},1} = 1 - \Pr(\gamma_1^{x_2} > \gamma_{\text{th},2}, \gamma_1^{x_1} > \gamma_{\text{th},1} | \hat{H} = H_0) = 1 - c \underbrace{\Pr(\gamma_1^{x_2} > \gamma_{\text{th},2}, \gamma_1^{x_1} > \gamma_{\text{th},1} | H_0, \hat{H} = H_0)}_{O_{\text{out},1}^1} + d \underbrace{\Pr(\gamma_1^{x_2} > \gamma_{\text{th},2}, \gamma_1^{x_1} > \gamma_{\text{th},1} | H_1, \hat{H} = H_0)}_{O_{\text{out},1}^2} \quad (10)$$

其中: $\gamma_{\text{th},1} = 2^{R_1} - 1$ 为 V_1 的保密 SINR 阈值, R_1 为解码 x_1 的目标速率。

授权频谱未被 PT 占用时 V_1 的中断概率为

$$O_{\text{out},1}^1 = \begin{cases} 0, & \frac{1}{1 + \gamma_{\text{th},2}} < \alpha_1 < 1 \\ 1 - \frac{\gamma \left(a + 1, \frac{1}{b} \sqrt{\psi'_{\text{out},1}} \right)}{\Gamma(a + 1)}, & \frac{\gamma_{\text{th},1}}{\gamma_{\text{th},1} + \gamma_{\text{th},2} + \gamma_{\text{th},1} \gamma_{\text{th},2}} < \alpha_1 \leq \frac{1}{1 + \gamma_{\text{th},2}} \\ 1 - \frac{\gamma \left(a + 1, \frac{1}{b} \sqrt{\psi_{\text{out},1}} \right)}{\Gamma(a + 1)}, & 0 < \alpha_1 \leq \frac{\gamma_{\text{th},1}}{\gamma_{\text{th},1} + \gamma_{\text{th},2} + \gamma_{\text{th},1} \gamma_{\text{th},2}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\psi'_{\text{out},1} = \frac{W \gamma_{\text{th},2}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \gamma_{\text{th},2}) P_s r_1^{-\beta}}$$

$$\psi_{\text{out},1} = \frac{W \gamma_{\text{th},1}}{\alpha_1 P_s r_1^{-\beta}}$$

利用

$$\int_0^\infty x^{\nu-1} \exp(-\beta x^2 - \gamma x) dx = (2\beta)^{-\frac{\nu}{2}} \Gamma(\nu) \exp\left(\frac{\gamma^2}{8\beta}\right) D_{-\nu}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right)$$

和 Gaussian-Chebyshev quadrature 定理,计算出授权频谱被 PT 占用时 V_1 的中断概率,即

$$O_{\text{out},1}^2 = \begin{cases} I_1, & 0 < \alpha_1 \leq \frac{\gamma_{\text{th},1}}{\gamma_{\text{th},1} + \gamma_{\text{th},2} + \gamma_{\text{th},1} \gamma_{\text{th},2}} \\ I_2, & \frac{\gamma_{\text{th},1}}{\gamma_{\text{th},1} + \gamma_{\text{th},2} + \gamma_{\text{th},1} \gamma_{\text{th},2}} < \alpha_1 < 1 \end{cases} \quad (12)$$

其中 $I_i (i = 1, 2)$ 为

$$I_i = 1 - \frac{\gamma \left(a + 1, \frac{1}{b} \sqrt{\psi} \right)}{\Gamma(a + 1)} - \frac{\exp(\tau_{\text{out},1})}{b^{a+1}} \times \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^{\frac{a+1}{2}} \exp\left(\frac{\varepsilon}{8b^2}\right) D_{-(a+1)}\left(\frac{1}{b} \sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\right) + \exp(\tau_{\text{out},1}) \frac{\psi \pi}{2L} \sum_{l=1}^L \frac{\sqrt{1 - \phi_l^2}}{2b^{a+1} \Gamma(a + 1)} \times \left(\sqrt{\frac{\psi(\phi_l + 1)}{2}} \right)^{a-1} \exp\left(-\frac{\tau_{\text{out},1}(\phi_l + 1)}{2} - \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\psi(\phi_l + 1)}{2}}\right) \quad (13)$$

其中: $\tau_{\text{out},1} = \frac{W}{\eta P_{\text{t},1} r_{\text{t},1}^{-\beta} \lambda_{\text{g},1}}$; 当 $i = 1$ 时, $\varepsilon = \varepsilon_{\text{out},1}$, $\varepsilon_{\text{out},1} =$

$$\frac{\eta P_{\text{t},1} r_{\text{t},1}^{-\beta} \gamma_{\text{th},1} \lambda_{\text{g},1}}{\alpha_1 P_s r_1^{-\beta}}, \psi = \psi_{\text{out},1}; \text{ 当 } i = 2 \text{ 时, } \varepsilon = \varepsilon'_{\text{out},1},$$

$$\varepsilon'_{\text{out},1} = \frac{\eta P_{\text{t},1} r_{\text{t},1}^{-\beta} \gamma_{\text{th},2} \lambda_{\text{g},1}}{(\alpha_2 - \alpha_1 \gamma_{\text{th},2}) P_s r_1^{-\beta}}, \psi = \psi'_{\text{out},1} \circ$$

3 截获性能分析

如果 V_e 能够成功窃听 NOMA 用户 V_2 和 V_1 的信号,即 $\gamma_e^q > \gamma_{\text{th},k}$, $q \in \{x_2, x_1\}$, $k \in (2, 1)$, V_2 和 V_1 的信息将会被截获,可得

$$O_{\text{int},k} = \Pr(\gamma_e^q > \gamma_{\text{th},k} | \hat{H} = H_0) = c \underbrace{\Pr(\gamma_e^q > \gamma_{\text{th},k} | H_0, \hat{H} = H_0)}_{O_{\text{int},k}^1} + d \underbrace{\Pr(\gamma_e^q > \gamma_{\text{th},k} | H_1, \hat{H} = H_0)}_{O_{\text{int},k}^2} \quad (14)$$

将式(2)和式(3)代入式(14),类似于式(7)~式(13)的计算过程,可以得到 V_1 和 V_2 的截获概率,即

$$O_{\text{int},k} = c O_{\text{int},k}^1 + d O_{\text{int},k}^2 \quad (15)$$

分别对 $O_{\text{int},k}^1$ 和 $O_{\text{int},k}^2$ 进行计算,可得式(16)~式(18),即

$$O_{\text{int},2}^1 = \begin{cases} 0, & \frac{1}{1 + \gamma_{\text{th},2}} < \alpha_1 < 1 \\ 1 - \frac{\gamma \left(a + 1, \frac{1}{b} \sqrt{\psi_{\text{int},2}} \right)}{\Gamma(a + 1)}, & 0 < \alpha_1 \leq \frac{1}{1 + \gamma_{\text{th},2}} \end{cases} \quad (16)$$

$$O_{\text{int},k}^2 = \frac{\gamma \left(a + 1, \frac{1}{b} \sqrt{\psi_{\text{int}}} \right)}{\Gamma(a + 1)} + \frac{\exp(\tau_{\text{int}})}{b^{a+1}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{int}}}{2} \right)^{\frac{a+1}{2}} \times$$

$$\exp\left(\left(\frac{\varepsilon_{\text{int}}}{8b^2}\right)D_{-(a+1)}\left(\frac{1}{b}\sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{int}}}{2}}\right) - \exp(\tau_{\text{int}})\frac{\psi_{\text{int}}\pi}{2L} \times \sum_{l=1}^L \frac{\sqrt{1-\phi_l^2}}{2b^{a+1}\Gamma(a+1)} \left(\sqrt{\frac{\psi_{\text{int}}(\phi_{\text{int}}+1)}{2}}\right)^{a-1} \times \exp\left(-\frac{\tau_{\text{int}}(\phi_{\text{int}}+1)}{2} - \frac{1}{b}\sqrt{\frac{\psi_{\text{int}}(\phi_{\text{int}}+1)}{2}}\right) \quad (17)$$

其中: 当 $k=1$ 时, $\psi_{\text{int}} = \frac{W\gamma_{\text{th},2}}{(\alpha_2 - \alpha_1\gamma_{\text{th},2})P_s r_e^{-\beta}}$, $\tau_{\text{int}} =$

$$\frac{W}{\eta P_{\text{t},e} r_{\text{t},e}^{-\beta} \lambda_{g_{1,e}}}, \varepsilon_{\text{int}} = \frac{\eta P_{\text{t},e} r_{\text{t},e}^{-\beta} \gamma_{\text{th},2} \lambda_{g_{1,e}}}{(\alpha_2 - \alpha_1\gamma_{\text{th},2})P_s r_e^{-\beta}}; \text{当 } k=2 \text{ 时,}$$

$$\psi_{\text{int}} = \frac{W\gamma_{\text{th},1}}{\alpha_1 P_s r_e^{-\beta}}, \varepsilon_{\text{int}} = \frac{\eta P_{\text{t},e} r_{\text{t},e}^{-\beta} \gamma_{\text{th},1} \lambda_{g_{1,e}}}{\alpha_1 P_s r_e^{-\beta}}.$$

$$O_{\text{int},1}^1 = 1 - \frac{\gamma\left(a+1, \frac{1}{b}\sqrt{\psi_{\text{int},1}}\right)}{\Gamma(a+1)} \quad (18)$$

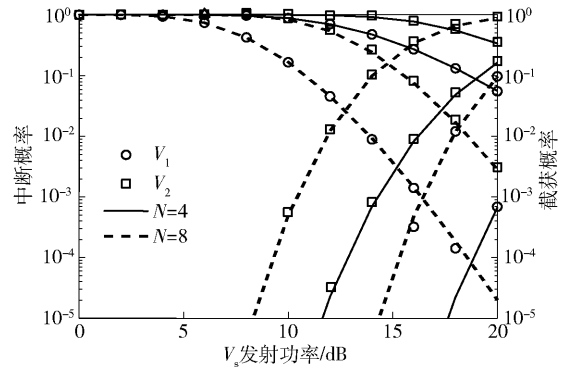
将式(16)~式(18)代入式(15)可得 V_1 和 V_2 的截获概率。

4 仿真实验结果

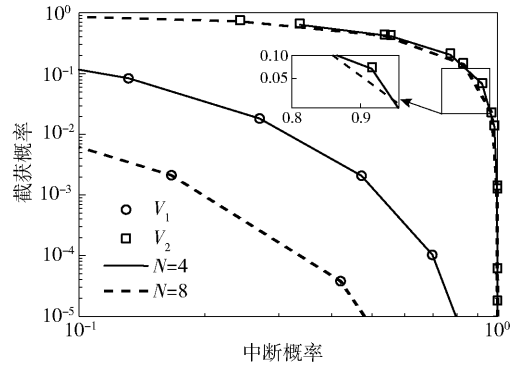
笔者通过仿真实验验证了理论分析的正确性,同时分析了一些关键参数对系统中断概率和截获概率的影响。在仿真实验中,参数设置为: $O_f = 0.01$, $O_d = 0.99$, $O_0 = 0.8$, $W = 1$, $\eta = 0.6$, $\beta = 2.7$, $P_t = 30 \text{ dB}$, $r_{t,1} = 12 \text{ m}$, $r_{t,2} = r_{t,e} = 20 \text{ m}$, $R_1 = 2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $R_2 = 1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $\lambda_{g_{1,1}} = 1$, $\lambda_{g_{1,2}} = 0.8$, $\lambda_{g_{1,e}} = 0.1$, 如非特别说明, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.8$, $N = 8$, $r_1 = 4 \text{ m}$, $r_2 = 10 \text{ m}$, $r_e = 15 \text{ m}$ 。

图2所示为不同 RIS 反射单元数下, V_2 和 V_1 的中断概率和截获概率与 V_s 发射功率的关系以及截获概率随中断概率的变化情况。从图2(a)可见,在 V_s 发射功率范围内,中断概率和截获概率的理论结果与仿真结果吻合性良好,验证了第3节和第4节中公式推导的正确性。随着 V_s 发射功率的提高,所有车辆的中断概率均减小,截获概率均增大。这是由于 V_s 发射功率的增大可以提高各接收车辆的 SINR,从而使中断概率递减,截获概率递增; V_1 比 V_2 具有更低的中断概率和截获概率,安全可靠更佳。此外, RIS 反射单元数 N 对中断概率产生了正面的影响,而对截获概率却有着负面的影响,这使系统的可靠性与安全性之间存在权衡问题。从图2(b)可见,随着中断概率逐渐增大,截获概率单调递减;反之亦然,这意味着在中断概率与截获概率之间存在

权衡问题。此外,随着 N 的增加, V_1 的安全-可靠性折中显著降低, V_2 的安全-可靠性折中则没有明显变化。这是因为 NOMA 用户采用 SIC 技术使得 N 对 V_1 SINR 的影响更大。值得注意的是, V_1 的截获概率小于 V_2 , 说明 V_1 的安全性能更高。因此,为了改善系统的安全-可靠性,需要更多的 RIS 反射单元。



(a) 不同 N 下中断和截获概率随 V_s 发射功率的变化



(b) 不同 N 下截获概率随中断概率的变化

图2 不同 N 下中断概率或截获概率的变化

图3所示为在不同 RIS 反射单元数和 V_s 与 V_e 的距离下,截获概率和中断概率随 V_s 发射功率的变化情况。从图3(a)可见,截获概率随着 N 的增加而增加,随着 r_e 的增加而减小,在所考虑区域范围内, r_e 对截获概率的影响大于 N 。从图3(b)可见,中断概率随着 V_s 发射功率的增加和 V_s 与 V_1, V_2 间距 r_1, r_2 的缩短而减小。然而, r_1, r_2 越小,对中断概率产生影响的 V_s 发射功率越小。

图4所示为不同目标速率下中断概率和截获概率随 V_s 发射功率的变化情况。从图4(a)可见,随着 V_1 目标速率 R_1 的增加, V_1 的中断概率增大,截获概率减小且变化程度更大;从图4(b)可见,随着 R_2 的增加, V_1 的中断概率几乎不变, V_2 的中断概率增大,截获概率减小且变化程度更大。因此,安全等级参

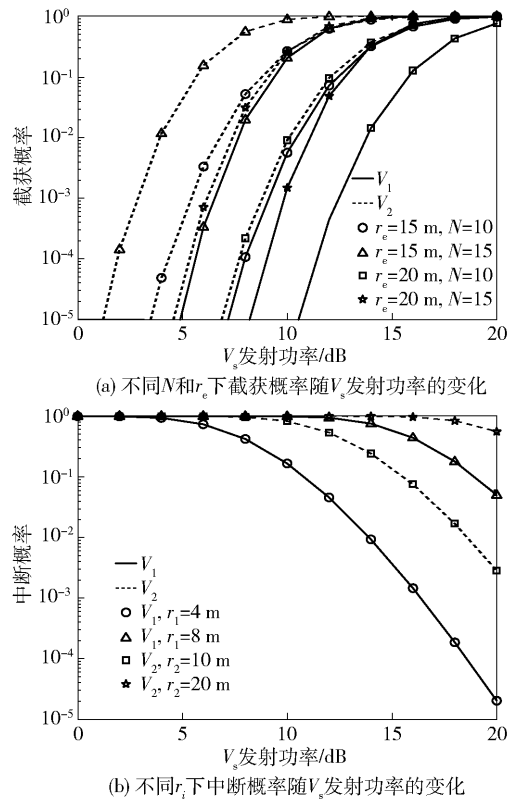


图 3 不同 N 和距离下载获概率和中断概率的变化

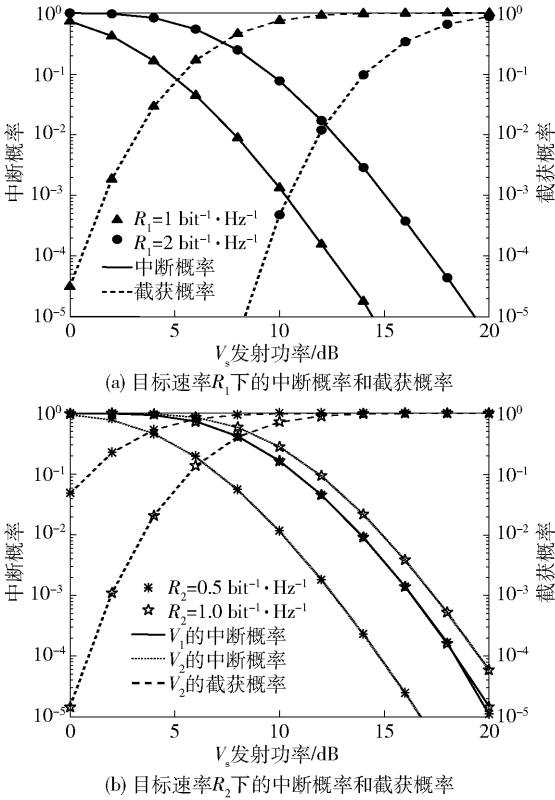


图 4 不同目标速率下中断概率和截获概率的变化

数对系统的物理层安全性有很大影响,目标速率越大越有利于提升系统的安全性。

5 结束语

基于认知 NOMA 系统建立了 RIS 辅助的 V2V 网络系统模型,考虑双瑞利衰落信道条件下,从系统的中断性能和截获性能 2 个角度分析了所建模型的物理层安全性能。结果表明,系统的安全性与可靠性之间存在折中且能够通过增加 RIS 的反射单元数量进行优化;此外,系统的物理层安全性能可以从源车辆的发射功率、车辆间距离、目标速率等方面得到提升。这些研究结果能够进一步提高认知 NOMA 网络和 RIS 技术在 V2V 网络中的适用性。

参考文献:

[1] 李美玲, 杨晓霞, 成文杰, 等. 车联网 CR-NOMA 系统物理层安全性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(1): 115-120.

LI M L, YANG X X, CHENG W J, et al. Physical layer security for CR-NOMA system in vehicle-to-everything[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(1): 115-120.

[2] LYU 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] MAKARFI A U, RABIE K M, KAIWARTYA O, et al. Toward physical-layer security for Internet of vehicles: interference-aware modeling[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(1): 443-457.

[6] PAN C H, REN H, WANG K Z, et al. Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1719-1734.

(下转第 139 页)