



研究与开发

过时 CSI 下全双工中继辅助 D2D 网络的物理层安全

沈静洁, 李光球, 罗延翠, 刘会芝

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 中继辅助终端直通 (device to device, D2D) 网络通过与蜂窝网络共享频谱提高 D2D 用户的频谱效率和蜂窝用户 (cellular user, CU) 的物理层安全性。为进一步改善其性能, 可以在基站和 D2D 链路的中继节点采用天线选择以及在中继节点采用全双工技术。然而, 由于存在反馈时延和移动性, 用于蜂窝链路和所有 D2D 链路天线选择的信道状态信息 (channel state information, CSI) 均可能是过时的, 针对该场景下的物理层安全性和可靠性问题, 提出一种主动窃听和过时 CSI 场景下基站和中继节点均采用发射天线选择的全双工中继辅助 D2D 网络安全模型, 推导 CU 的中断概率、遍历容量、非零安全容量概率、安全中断概率、渐近安全中断概率的解析表达式。数值计算与仿真结果均表明, 基站发射天线数、中继干扰天线数越多, CU 的安全性能越好; 过时的 CSI 会降低 CU 的中断性能和安全性能。

关键词: D2D 网络; 物理层安全; 过时信道状态信息; 全双工中继; 发射天线选择

中图分类号: TN918.1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023041

Physical layer security of full-duplex relay-assisted D2D networks under outdated CSI

SHEN Jingjie, LI Guangqiu, LUO Yancui, LIU Huizhi

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

Abstract: The relay aided device to device (D2D) network can improve the spectrum efficiency of D2D users and the physical layer security of cellular user (CU) by sharing spectrum with the cellular network. To further improve their performance, transmit antenna selection can be used at the base station and the relay node of the D2D link, and full duplex technology can be used in the relay node. However, due to the feedback delay and mobility, the channel state information (CSI) used for the antenna selection of cellular link and all D2D links may be outdated. For the physical layer security and reliability in the above scenario, security model of a full duplex relay aided D2D network was proposed in the presence of active eavesdropping and outdated CSI, in which the base station and relay nodes both used transmit antenna selection. The closed-expressions for outage probability, ergodic capacity, probability of non-zero secrecy capacity, secure outage probability, asymptotic secure outage probability of relay aided D2D networks were derived. The numerical calculation and simulation results show that the more the number of base station transmit antennas and relay jamming antennas are, the better the CU security performance is. The outdated CSI will deteriorate the outage and security performance of CU.

Key words: D2D network, physical layer security, outdated CSI, full-duplex relay, transmit antenna selection



0 引言

终端直通 (device to device, D2D) 技术是一种通信网络中相邻设备之间的直接信息交换技术, 可通过与蜂窝网络共享频谱, 实现 5G 网络中的海量机器类通信, 具有功耗低、频谱效率高、时延低等优点, 在本地业务、社交应用、物联网增强、车联网、应急通信等中有非常广泛的应用前景^[1-3]。D2D 通信中的关键技术之一是要解决好 D2D 用户和蜂窝用户 (cellular user, CU) 之间的相互干扰问题^[2-3]。文献[3]推导了 CU 和 D2D 用户间相互干扰下 D2D 网络的中断概率。在距离较远或有障碍物等信道条件不利情况下, D2D 用户之间无直达链路, 需中继辅助才能实现 D2D 用户之间的通信^[4-7]。文献[4]研究了放大转发 (amplify-and-forward, AF) 中继辅助 D2D 网络的中断性能。文献[5]推导了双向解码转发中继辅助 D2D 网络的中断概率解析表达式。相比于半双工模式, 全双工模式可以提升中继辅助 D2D 网络的频谱效率^[6-7]。文献[6]研究了采用功率控制的全双工中继辅助 D2D 网络的速率和可达性能。文献[7]推导了基于功率分配的全双工中继辅助 D2D 网络的中断概率解析表达式。发射天线选择 (transmit antenna selection, TAS) 技术具有性能好、复杂度低等优点, 可进一步改善中继辅助 D2D 网络的性能^[8-10]。天线选择需要无线链路的信道状态信息 (channel state information, CSI)^[8-11]。文献[9-10]分别研究了理想 D2D 链路 CSI 下采用 TAS 的单/多中继辅助 D2D 网络的中断性能。但在实际情况中, 由于存在反馈时延和移动性, 理想 CSI 难以获得, 会存在过时情况^[11]。文献[11]研究了过时 D2D 链路 CSI 下中继辅助 D2D 网络的遍历和速率性能。

无线传输的开放性使得蜂窝用户和 D2D 用户易遭受恶意窃听攻击, 产生信息传输安全威胁^[12-13]。研究结果表明, CU 和 D2D 用户之间的相互干扰可用于提高 CU 链路的物理层安全性能^[14-20], 这

通常以非零安全容量概率 (probability of non-zero secrecy capacity, PNSC) 和安全中断概率 (secrecy outage probability, SOP) 等性能指标表征^[14-20]。文献[15]研究了全双工与人工噪声干扰结合的 D2D 蜂窝网络的遍历安全速率。文献[16]研究了混合衰落信道上在中继节点采用人工噪声干扰的中继辅助 D2D 网络中 CU 的 PNSC 和 SOP 性能。当 D2D 用户的发射功率远小于基站的发射功率时, 只需要考虑仅有 CU 会被非法窃听的情况^[17]。文献[17]推导了理想 D2D 链路 CSI 下基站和中继节点均采用 TAS 的、被动窃听场景下的全双工中继辅助 D2D 网络中 CU 的 SOP、PNSC 解析表达式。文献[18]推导了理想 D2D 链路 CSI 和主动窃听场景下中继辅助 D2D 网络中 D2D 链路的中断概率和 CU 的 SOP 解析表达式。文献[19]推导了过时 D2D 链路 CSI 下基站和中继采用 TAS 的全双工中继辅助 D2D 网络中 D2D 链路的中断概率和 CU 的 SOP、渐近 SOP 解析表达式。

综上, 中继辅助 D2D 网络利用全双工技术、发射天线选择和人工噪声干扰可以实现提高 D2D 用户频谱效率和提升 CU 安全性的双赢, 目前的研究均假定所有 D2D 链路具有理想 CSI 或过时 CSI, 蜂窝链路具有理想 CSI, 且大多为被动窃听场景。然而, 蜂窝网络的 CSI 也可能是过时的, 需要同时关注窃听攻击也可能是主动窃听的情况, 为此, 需要研究 D2D 链路和蜂窝链路均为过时 CSI、主动窃听场景下采用 TAS 的全双工 D2D 网络中 CU 的可靠性和安全性, 目前还未见有相关研究, 本文拟填补这个空白, 推导了上述网络中 CU 的中断概率、遍历容量、PNSC、SOP、渐近 SOP 的精确解析表达式, 并分析其性能。

1 系统模型

1.1 物理层安全模型

考虑过时 CSI 下, 基站和中继均采用 TAS 的

全双工中继辅助 D2D 网络（以下简称 D2D 网络）物理层安全模型，如图 1 所示。蜂窝网络由基站 BS、蜂窝用户 CU、主动窃听者 E 组成。D2D 网络由发送端 T、接收端 D 以及全双工中继 R 组成，且 R 在协助 D2D 进行通信的同时还作为协作干扰节点对 E 进行干扰。CU、E、T 和 D 均配置单根天线，BS 配置 N_B 根发射天线，R 配置 N_D 根数据天线用于收发信息、 N_I 根天线用于对 E 实施人工噪声干扰。

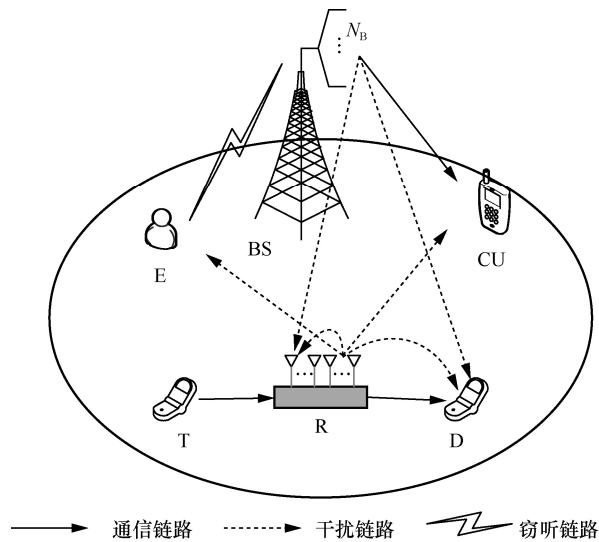


图 1 D2D 网络物理层安全模型

假定：①BS 的第 m 根发送天线至 CU、E，以及 R 的第 l 根干扰天线至 CU、E 的链路分别简记为 mC 、 mE 、 lC 、 lE ；②实际链路增益为 h_v ，服从复高斯分布 $\mathcal{CN} \sim (0,1)$ ， $v \in \{mC, mE, lC, lE\}$ ；③CU 和 E 接收天线上的加性白高斯噪声（additive white Gaussian noise, AWGN）相互独立，且服从复高斯分布 $\mathcal{CN} \sim (0, \sigma_k^2)$ ， $k \in \{C, E\}$ ，C 表示 CU；④R 发射的人工噪声干扰会对 E、CU 产生影响；⑤R 发射的人工噪声干扰功率 P_I 大于其放大前传的发射功率 P ，T 的发射功率与 R 放大前传的发射功率相等且较小，对 CU 的干扰可以忽略不计，E 也无法实施窃听^[18]；⑥对于主动窃听，R 可获知 lE 链路的瞬时 CSI。

1.2 传输过程

D2D 网络的信号传输在两个时隙内完成。在第一时隙内，T 发送信号给 R，同时 R 采用 TAS 发送人工噪声干扰 E；在第二时隙内，R 放大转发第一时隙接收到的信号给 D，同时 R 也采用 TAS 发送人工噪声干扰 E。在两个时隙内，BS 均向 CU 发送信号，E 实施主动窃听。

BS 选择 N_B 根天线中使 BS 至 CU 链路增益最大的第 m^* 根天线发送信号， $m^* = \arg \max_{1 \leq m \leq N_B} |h_{mC}|^2$ ， m^*C 链路记为 BC；R 选择 N_I 根天线中使 R 至 E 链路增益最大的第 l^* 根天线发送干扰信号， $l^* = \arg \max_{1 \leq l \leq N_I} |\tilde{h}_{lE}|^2$ ， l^*E 链路记为 RE。令 $k \in \{C, E\}$ 分别表示节点 CU 或 E，则 k 处的接收信号 y_k 为：

$$y_k = \sqrt{P_B} h_{m^*k} x_b + \sqrt{P_I} h_{l^*k} x_j + n_k, \quad k \in \{C, E\} \quad (1)$$

其中， P_B 为 BS 的发送功率， x_b 、 x_j 分别为 BS 的发射信号和 R 发送的干扰信号， n_k 表示节点 k 接收天线上的 AWGN。节点 k 处的瞬时信干噪比（signal to interference plus noise ratio, SINR） γ_k 表示为：

$$\gamma_k = \frac{\gamma_{Bk}}{1 + \gamma_{Rk}}, \quad k \in \{C, E\} \quad (2)$$

其中， $\gamma_{Bk} = w_k |h_{m^*k}|^2$ ， $\gamma_{Rk} = \mu_k |h_{l^*k}|^2$ ， $w_k = P_B / \sigma_k^2$ 为 BC 或 BE 链路的平均信噪比； $\mu_k = P_I / \sigma_k^2$ 为 RC 或 RE 链路的平均信噪比。

1.3 信道模型

由于存在反馈时延和移动性，参照文献[20]，可将 BC 链路、RE 链路建模为 Jakes 信道模型，即实际信道增益 h_v 和过时信道增益 $\tilde{h}_v$ 之间的关系为：

$$h_v = \rho_v \tilde{h}_v + \sqrt{1 - \rho_v^2} g \quad (3)$$

其中， $\rho_v = I_0(2\pi f_v \tau_v)$ 为 $\tilde{h}_v$ 与 h_v 之间的相关系数， τ_v 为反馈时延， f_v 为多普勒频移， $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数， g 为服从复高斯分布 $\mathcal{CN} \sim (0,1)$ 的随机变量。



基站 BS 采用 TAS 从 N_B 根发送天线中选择使 BC 链路瞬时信噪比 γ_{BC} 最大的天线进行发送、R 采用 TAS 从 N_I 根干扰天线中选择使 RE 链路瞬时信噪比 γ_{RE} 最大的天线进行发送。

由于 BC 或 RE 链路采用相似的信道模型, 它们两者的区别仅在于归一化时延不同, 因此可以采用相似的步骤推导 γ_{BC} 或 γ_{RE} 的概率密度函数 (probability density function, PDF)。具体分为以下 3 步。

(1) 为求得过时 CSI 下 BC 链路、RE 链路接收信噪比的 PDF。令 $t \in \{BC, RE\}$ 分别表示采用发射天线选择的 BC 链路、采用干扰天线选择的 RE 链路, 则过时 CSI 下 t 链路的瞬时信噪比 $\tilde{\gamma}_t$ 的 PDF 为^[19]:

$$f_{\tilde{\gamma}_t}(\gamma) = \sum_{n=0}^{N_t-1} I_{n,N_t} \frac{1+n}{\delta_t} e^{-\gamma(n+1)/\delta_t} \quad (4)$$

其中, $I_{n,N_t} = \binom{N_t-1}{n} \frac{(-1)^n N_t}{(n+1)}$, δ_t 为 t 链路的平均信噪比, N_t 为 t 链路中的发射天线数。

(2) 求得过期信噪比 $\tilde{\gamma}_t$ 下实际信噪比 γ_t 的条件 PDF: 根据文献[18]可得, 给定过期信噪比 $\tilde{\gamma}_t$ 下实际 BC 链路或 RE 链路信噪比 γ_t 的条件 PDF $f_{\gamma_t|\tilde{\gamma}_t}(\cdot)$ 为:

$$f_{\gamma_t|\tilde{\gamma}_t}(\gamma|x) = \frac{1}{\Delta_t} \exp\left(-\frac{(\gamma + \rho_t^2 x)}{\Delta_t}\right) I_0\left(\frac{2\rho_t \sqrt{\gamma x}}{\Delta_t}\right) \quad (5)$$

其中, $\Delta_t = (1 - \rho_t^2)\delta_t$, ρ_t 为过时与实际 CSI 下 t 链路的相关系数。

(3) 将式 (4) 与式 (5) 相乘, 并对 $\tilde{\gamma}_t$ 求积分即可得到实际 BC 链路或 RE 链路信噪比 γ_t 的 PDF, 即实际 CSI 下链路信噪比 γ_t 的 PDF 为:

$$f_{\gamma_t}(\gamma) = \int_0^\infty f_{\gamma_t|\tilde{\gamma}_t}(\gamma|x) f_{\tilde{\gamma}_t}(x) dx \quad (6)$$

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (6), 同时利用文献[21]的式 (6.643.2) 和式 (9.220.2) 可推得实际 CSI 下瞬时信噪比 γ_t 的 PDF 和累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 分别为:

$$f_{\gamma_t}(\gamma) = \sum_{n=0}^{N_t-1} I_{n,N_t} \frac{n+1}{\varepsilon_t} e^{-(n+1)\gamma/\varepsilon_t} \quad (7)$$

$$F_{\gamma_t}(\gamma) = 1 - \sum_{n=0}^{N_t-1} I_{n,N_t} e^{-(n+1)\gamma/\varepsilon_t} \quad (8)$$

其中, $\varepsilon_t = \Delta_t(n+1) + \rho_t^2 \delta_t$, $t \in \{BC, RE\}$ 分别表示 BC 链路、RE 链路。

2 性能分析

过时 CSI 下 D2D 网络中蜂窝链路的信道容量为 $C_C = \ln(1 + \gamma_C)$, 窃听链路的信道容量为 $C_E = \ln(1 + \gamma_E)$, γ_C 和 γ_E 由式 (2) 给出。

2.1 非零安全容量概率

D2D 网络中 CU 的安全容量为:

$$C_s = \max\{C_C - C_E, 0\} \quad (9)$$

参照文献[18], 可将过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的非零安全容量概率 P^{non} 定义为 CU 的安全容量 C_s 大于 0 的概率。根据式 (9) 和文献[18]的式 (46) 可得:

$$P^{\text{non}} = 1 - P_r(\gamma_C < \gamma_E) = 1 - \int_0^\infty F_{\gamma_C}(\gamma) f_{\gamma_E}(\gamma) d\gamma \quad (10)$$

其中, $P_r(\cdot)$ 表示求概率。

根据式 (2) 可得 γ_C 的 CDF 表达式为:

$$F_{\gamma_C}(\gamma) = P_r(\gamma_{BC} / (1 + \gamma_{RC}) < \gamma) = \int_0^\infty F_{\gamma_{BC}}(\gamma(x+1)) f_{\gamma_{RC}}(x) dx \quad (11)$$

由于 γ_{RC} 服从参数为 $1/\mu_C$ 的指数分布, 同时将式 (8) 代入式 (11) 可得 γ_C 的 CDF 为:

$$F_{\gamma_C}(\gamma) = 1 - \sum_{n=0}^{N_B-1} \frac{I_{n,N_B} e^{-z\gamma}}{\mu_C} \int_0^\infty e^{-(\gamma z + 1/\mu_C)x} dx = 1 - \sum_{n=0}^{N_B-1} \frac{I_{n,N_B} e^{-z\gamma}}{(1/\mu_C + z\gamma)\mu_C} \quad (12)$$

其中, $z = (n+1) / ((n+1)\Delta_{BC} + \rho_{BC}^2 w_C)$, $\Delta_{BC} = (1 - \rho_{BC}^2)w_C$, $\rho_{BC} = I_0(2\pi f_{BC} \tau_{BC})$ 为 BC 链路的相关系数。

由于 γ_{BE} 服从参数为 $1/w_E$ 的指数分布, 根据

文献[18]的式(54)可得 γ_E 的PDF表达式为:

$$f_{\gamma_E}(\gamma) = \int_0^\infty (x+1)f_{\gamma_{BE}}(\gamma(x+1))f_{\gamma_{RE}}(x)dx = \sum_{i=0}^{N_J-1} I_{i,N_J} \frac{s(w_E + sw_E + \gamma)e^{-\gamma/w_E}}{(sw_E + \gamma)^2} \quad (13)$$

其中, $s = (i+1) / ((i+1)\Delta_{RE} + \rho_{RE}^2 \mu_E)$, $\Delta_{RE} = (1 - \rho_{RE}^2) \mu_E$, $\rho_{RE} = I_0(2\pi f_{RE} \tau_{RE})$ 为 RE 链路的相关系数。

将式(12)和式(13)代入式(10)并化简后可推得过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的 PNSC 表达式为:

$$P^{\text{non}} = \sum_{n=0}^{N_B-1} \sum_{i=0}^{N_J-1} \frac{I_{n,N_B} I_{i,N_J} s}{\mu_C z} \int_0^\infty \frac{(w_E + sw_E + \gamma)e^{-A\gamma}}{(sw_E + \gamma)^2 [1 / (\mu_C z) + \gamma]} d\gamma \quad (14)$$

其中, $A = 1 / w_E + z$ 。

为推导式(14), 令:

$$\Phi(a, b, c, g) = \int_0^\infty \frac{b + \gamma}{(a + \gamma)^2 (\gamma + c)} e^{-g\gamma} d\gamma \quad (15)$$

对式(15)进行部分分式展开, 同时利用文献[21]中的式(3.352.4)和式(3.353.3)进行化简, 经整理后可推得:

$$\begin{aligned} \Phi(a, b, c, g) = & K \int_0^\infty \left(\frac{1 + K(b-a)}{c + \gamma} - \frac{K(b-a) + 1}{a + \gamma} - \frac{b-a}{(a + \gamma)^2} \right) \\ & e^{-g\gamma} d\gamma = [(b-a)K^2 + K] \\ & [L(ga) - L(gc)] - K(b-a) \left(gL(ga) + \frac{1}{a} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $K = 1 / (a - c)$, $L(x) = e^x \text{Ei}(-x)$, $\text{Ei}(\cdot)$ 为指数积分函数。

利用式(16), 由式(14)可得过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的 PNSC 精确解析表达式为:

$$P^{\text{non}} = \sum_{n=0}^{N_B-1} \sum_{i=0}^{N_J-1} \frac{I_{n,N_B} I_{i,N_J} s}{\mu_C z} \Phi(sw_E, (s+1)w_E, 1 / (\mu_C z), A) \quad (17)$$

由式(17)可得定理1。

定理1 过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的 PNSC 与基站的发射天线数 N_B 、中继的干扰天线

数 N_J 、BC 链路的平均信噪比 w_C 、BE 链路的平均信噪比 w_E 、RC 链路的平均信噪比 μ_C 、基站至 CU 链路的归一化时延 $f_{BC} \tau_{BC}$ 和中继至窃听者 E 链路的归一化时延 $f_{RE} \tau_{RE}$ 等参数有关。

2.2 安全中断概率

参照文献[18], 可将 D2D 网络中 CU 的安全中断概率 P_{sop} 定义为 CU 的安全容量小于目标安全速率 R_s 的概率, 则由式(9)可知 P_{sop} 的表达式为^[18]:

$$P_{\text{sop}} = P_r \{ (1 + \gamma_C) / (1 + \gamma_E) < 2^{R_s} \} \quad (18)$$

令 $\beta = 2^{R_s}$, $\alpha = \beta - 1$, 将式(18)进一步化简得到:

$$P_{\text{sop}} = P_r \{ \gamma_C < \beta \gamma_E + \alpha \} = \int_0^\infty F_{\gamma_C}(\beta \gamma + \alpha) f_{\gamma_E}(\gamma) d\gamma \quad (19)$$

将式(12)和式(13)代入式(19)并化简整理后可推得:

$$P_{\text{sop}} = 1 - \sum_{n=0}^{N_B-1} \sum_{i=0}^{N_J-1} \frac{I_{n,N_B} I_{i,N_J} s e^{-z\alpha}}{\beta \mu_C z} \int_0^\infty \frac{(w_E + sw_E + \gamma)e^{-B\gamma}}{(sw_E + \gamma)^2 (Q + \gamma)} d\gamma \quad (20)$$

其中, $B = 1 / w_E + \beta z$, $Q = 1 / (z \beta \mu_C) + \alpha / \beta$ 。

利用式(16), 可得过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的 SOP 精确解析表达式为:

$$P_{\text{sop}} = 1 - \sum_{n=0}^{N_B-1} \sum_{i=0}^{N_J-1} \frac{I_{n,N_B} I_{i,N_J} s e^{-z\alpha}}{\beta \mu_C z} \Phi(sw_E, (1+s)w_E, Q, B) \quad (21)$$

定理2 过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的 SOP 与基站的发射天线数 N_B 、中继的干扰天线数 N_J 、BC 链路的归一化时延 $f_{BC} \tau_{BC}$ 、RE 链路的归一化时延 $f_{RE} \tau_{RE}$ 、BC 链路的平均信噪比 w_C 、BE 链路的平均信噪比 w_E 、RC 链路的平均信噪比 μ_C 等参数有关。

若中继 R 工作在半双工模式, 且令蜂窝链路的 ρ_{BC} 为 1, 比较后发现: ①由式(21)可得文献[18]中基站和中继均采用 TAS 的半双工中继辅助 D2D



网络的 SOP 性能；与文献[18]的单天线基站场景相比，本文的结果可适用于基站天线为任意数目的 TAS 情况。②若再令①中的 N_B 为 1，由式 (21) 可以得到文献[18]中的式 (55)。可见，式 (21) 可适用于更多的应用场景，更具一般性。

2.3 渐近安全中断概率

下面研究高信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 下的渐近 SOP，以直观地反映各参数对 D2D 网络中 CU 的安全性能的影响。当 $w_c \rightarrow \infty$ 时，过 CSI 下 D2D 网络中 CU 的渐近 SOP 可表示为^[19]：

$$P_{\text{sop}}^\infty = (\Theta w_c)^{-G_d} + o(w_c^{-G_d}) \quad (22)$$

其中， $o(\cdot)$ 表示高阶无穷小； G_d 表示 CU 的安全分集增益，反映了安全中断概率曲线随蜂窝链路的平均信噪比 w_c 变化的快慢，表现为安全中断概率曲线的斜率； Θ 表示 CU 的安全编码增益，反映了相较于参考曲线 $w_c^{-G_d}$ 的信噪比增益。

2.3.1 过 CSI

利用文献[22]的式 (60)，由式 (11) 可得 $F_{\gamma_c}^\infty$ 为：

$$F_{\gamma_c}^\infty(\gamma) \approx \sum_{n=0}^{N_B-1} \frac{V_{n,N_B} \gamma}{[1+n(1-\rho_{\text{BC}}^2)]w_c \mu_c} \quad (23)$$

$$\int_0^\infty (x+1)e^{-x/\mu_c} dx \approx \sum_{n=0}^{N_B-1} \frac{V_{n,N_B} \gamma (1+\mu_c)}{[1+n(1-\rho_{\text{BC}}^2)]w_c}$$

其中， $V_{n,N_B} = I_{n,N_B}(n+1)$ 。将式 (23)、式 (13) 代入式 (19) 可得 $\rho_{\text{BC}} < 1$ 时 D2D 网络中 CU 的渐近 SOP 表达式为：

$$P_{\text{sop}}^\infty = \sum_{n=0}^{N_B-1} \sum_{i=0}^{N_J-1} \frac{V_{n,N_B} I_{i,N_J} (1+\mu_c) s}{[1+n(1-\rho_{\text{BC}}^2)]w_c w_E} \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^2 \int_0^\infty \frac{\beta \gamma + \alpha}{(s + \gamma / w_E)^k} e^{-\gamma / w_E} d\gamma$$

为推导式 (24)，令：

$$M(l, m, n, q) = \int_0^\infty \frac{\gamma^n e^{-\gamma/m}}{(l + \gamma/m)^q} d\gamma \quad (25)$$

对式 (25) 进行变量代换，同时利用文献[21]的式 (3.383.4) 化简式 (25)，得到：

$$M(l, m, n, q) = m^q e^l \int_{lm}^\infty (y - lm)^n y^{-q} e^{-y/m} dy = \Gamma(n+1) e^{l/2} m^{n+1} l^{(n-q)/2} W_{-\frac{(n+q)}{2}, -\frac{(n+1-q)}{2}}(l) \quad (26)$$

其中，惠特克函数 $W_{\lambda, \eta}(z) = \frac{z^{\eta+1/2} e^{-z/2}}{\Gamma(\eta - \lambda + 1/2)} \int_0^\infty e^{-zt} t^{\eta-\lambda-1/2} (1+t)^{\eta+\lambda-1/2} dt$ 。利用式 (26)，式 (24) 可变为：

$$P_{\text{sop}}^\infty = \frac{1}{w_c} \sum_{n=0}^{N_B-1} \sum_{i=0}^{N_J-1} \sum_{k=1}^2 \frac{V_{n,N_B} I_{i,N_J} (1+\mu_c) s}{[1+n(1-\rho_{\text{BC}}^2)]w_E} [\beta M(s, w_E, 1, k) + \alpha M(s, w_E, 0, k)] \quad (27)$$

将式 (27) 和式 (22) 进行对照，可推得 $\rho_{\text{BC}} < 1$ 下 D2D 网络中 CU 的安全分集增益 G_{d1} 为 1，安全编码增益 Θ_1 表达式为：

$$\Theta_1 = \left[\sum_{n=0}^{N_B-1} \sum_{i=0}^{N_J-1} \sum_{k=1}^2 \frac{V_{n,N_B} I_{i,N_J} (1+\mu_c) s}{[1+n(1-\rho_{\text{BC}}^2)]w_E} [\beta M(s, w_E, 1, k) + \alpha M(s, w_E, 0, k)] \right]^{-1} \quad (28)$$

2.3.2 理想 CSI

在 $\rho_{\text{BC}} = 1$ 的理想 CSI 情况下， F_{γ_c} 的近似表达式为^[19]：

$$F_{\gamma_c}^\infty(\gamma) \approx \sum_{m=0}^{N_B} \binom{N_B}{m} \frac{m! \mu_c^m \gamma^{N_B}}{w_c^{N_B}} \quad (29)$$

将式 (13) 和式 (29) 代入式 (19) 并化简整理后，可得到理想 CSI 下 D2D 网络中 CU 的渐近 SOP 表达式为：

$$P_{\text{sop}}^\infty = \sum_{i=0}^{N_J-1} \sum_{m=0}^{N_B} \binom{N_B}{m} \sum_{n=0}^{N_B} \binom{N_B}{n} \frac{I_{i,N_J} s m! \mu_c^m \beta^n}{w_c^{N_B} w_E \alpha^{n-N_B}} \quad (30)$$

$$\sum_{q=1}^2 \int_0^\infty \frac{\gamma^n e^{-\gamma/w_E}}{(s + \gamma/w_E)^q} d\gamma$$

利用式 (25) 和式 (26)，式 (30) 可化简为：

$$P_{\text{sop}}^\infty = \frac{1}{w_c^{N_B}} \sum_{i=0}^{N_J-1} \sum_{m=0}^{N_B} \binom{N_B}{m} \sum_{n=0}^{N_B} \binom{N_B}{n} \sum_{q=1}^2 \frac{I_{i,N_J} s m! \mu_c^m \beta^n}{w_E \alpha^{n-N_B}} M(s, w_E, n, q) \quad (31)$$

将式 (31) 和式 (22) 进行对照，可得到理想 CSI 下 D2D 网络中 CU 的安全分集增益 G_{d2} 为 N_B ，则安全编码增益 Θ_2 表达式为：

$$\Theta_2 = \left[\sum_{i=0}^{N_J-1} \sum_{m=0}^{N_B} \binom{N_B}{m} \sum_{n=0}^{N_B} \binom{N_B}{n} \right. \\ \left. \sum_{q=1}^2 \frac{I_{i,N_J} sm! M(s, w_E, n, q)}{w_E \alpha^{n-N_B} \mu_C^m \beta^n} \right]^{-1/N_B} \quad (32)$$

由式 (27)、式 (28) 和式 (31)、式 (32) 可得定理 3。

定理 3 在 D2D 网络中, 过时 CSI 下 CU 的安全分集增益为 1, 与基站的发射天线数无关; 理想 CSI 下 CU 的安全分集增益为 N_B ; 过时 CSI 下 CU 的安全编码增益与基站发射天线数 N_B 、中继干扰天线数 N_J 、BC 链路的归一化时延 $f_{BC}\tau_{BC}$ 和 RE 链路的归一化时延 $f_{RE}\tau_{RE}$ 、BC 链路的平均信噪比 w_C 、BE 链路的平均信噪比 w_E 、RC 链路的平均信噪比 μ_C 等参数有关。

2.4 CU 的中断概率

过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的中断概率 P_{op} 定义为蜂窝链路的信道容量 C_C 小于其信息速率 R_d 的概率, 表达式为:

$$P_{op} = P_r(\gamma_C < \phi) = F_{\gamma_C}(\phi) \quad (33)$$

其中, $\phi = 2^{R_d} - 1$ 。

将式 (12) 代入式 (33) 可得:

$$P_{op} = 1 - \sum_{n=0}^{N_B-1} \frac{I_{n,N_B} e^{-z\phi}}{(1/\mu_C + z\phi)\mu_C} \quad (34)$$

其中, $z = (n+1) / ((n+1)\Delta_{BC} + \rho_{BC}^2 w_C)$ 。

定理 4 过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的中断概率与基站的发射天线数 N_B 、基站 BS 至 CU 链路的归一化时延 $f_{BC}\tau_{BC}$ 、BC 链路的平均信噪比 w_C 等参数有关。

2.5 CU 的遍历容量

参照文献[23], 将蜂窝链路的信道容量 C_C 与 CU 的瞬时 SINR γ_C 的 PDF 求统计平均, 可得过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的遍历容量 C_d 表达式为:

$$C_d = E(C_C) = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_{\gamma_C}(y)}{1+y} dy \quad (35)$$

其中, $E(\cdot)$ 为求数学期望。

将式 (12) 代入式 (35) 并利用文献[21]的

式 (3.352.4) 可推导得:

$$C_d = \frac{1}{\ln 2} \sum_{n=0}^{N_B-1} I_{n,N_B} \int_0^\infty \frac{e^{-zy}}{(1+z\mu_C y)(1+y)} dy = \\ \sum_{n=0}^{N_B-1} I_{n,N_B} \frac{L(1/\mu_C) - L(z)}{\ln 2(1 - z\mu_C)} \quad (36)$$

其中, $z = (n+1) / ((n+1)\Delta_{BC} + \rho_{BC}^2 w_C)$ 。

定理 5 过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的遍历容量与基站的发射天线数 N_B 、基站 BS 至 CU 链路的归一化时延 $f_{BC}\tau_{BC}$ 、BC 链路的平均信噪比 w_C 等参数有关。

3 数值计算与仿真结果

下面对过时 CSI 下 D2D 网络中 CU 的 PNSC、SOP、中断概率及遍历容量进行数值计算与仿真, 研究不同系统参数对其安全性、可靠性等指标的影响。参考文献[18]的参数设置, 令目标安全速率 $R_s=1$ bit/(s·Hz), 信息速率 $R_d=1$ bit/(s·Hz), 过时 CSI 下 D2D 网络的仿真参数见表 1。

表 1 过时 CSI 下 D2D 网络的仿真参数

参数名称	参数值	参数说明
BS 的发射天线数 N_B	2	图 3~图 4、图 6~图 7
R 的干扰天线数 N_J	3	图 3~图 4、图 6~图 7
BE 链路平均信噪比 w_E	15 dB	图 2~图 3
RC 链路平均信噪比 μ_C	10 dB	图 2~图 9
RE 链路平均信噪比 μ_E	10 dB	图 2~图 7
BC 链路的归一化时延 $f_{BC}\tau_{BC}$	0.1	图 2、图 4~图 5、图 7
RE 链路的归一化时延 $f_{RE}\tau_{RE}$	0.1	图 2~图 3、图 5~图 6

不同 N_B 和 N_J 下 D2D 网络中 CU 的 PNSC 性能曲线如图 2 所示。由图 2 可知: ① N_B 越大, 过时 CSI 下 CU 的 PNSC 越大, 这是由于增大 N_B 后, CU 的接收 SINR 增大, 蜂窝链路信道容量增大, 窃听信道容量不变, 从而使得 CU 的安全容量增大, PNSC 增大, 如当 $N_J=4$ 、 $w_C=10$ dB 时, 若 N_B 从 1 增大到 4, CU 的 PNSC 从 0.423 增大到 0.607; ② N_J 越大, CU 的 PNSC 越大, 这是由于增大干扰天线数 N_J 后, R 对 E 的干扰增强, 窃听信道容量减小, 蜂窝链路信



道容量不变,从而使CU的安全容量增大,PNSC增大,如当 $N_B=1$ 、 $w_c=10$ dB时,若 N_j 从1增大到4,蜂窝用户的PNSC从0.293增大到0.423。

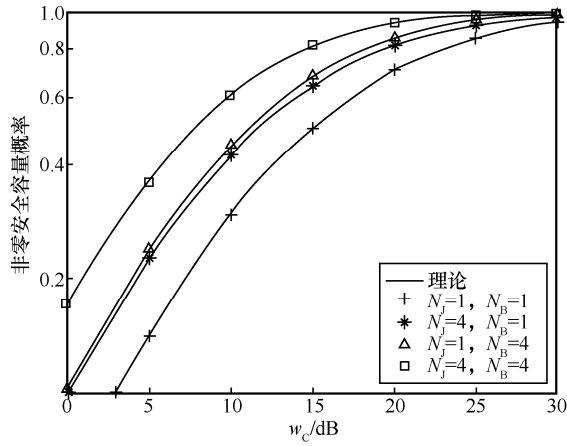


图2 不同 N_B 和 N_j 下D2D网络中CU的PNSC性能曲线

不同 $f_{BC}\tau_{BC}$ 下D2D网络中CU的PNSC性能曲线如图3所示。由图3可知:①蜂窝链路的平均信噪比 w_c 越大,过时CSI下CU的PNSC越大,这是由于增大 w_c 后,蜂窝链路信道容量增大,窃听信道容量不变,从而使CU的安全容量增大,PNSC增大;② $f_{BC}\tau_{BC}$ 越小,越接近理想CSI,CU的PNSC越大,这是由于减小 $f_{BC}\tau_{BC}$ 后,CU的接收SINR增大,蜂窝链路信道容量增大,窃听信道容量不变,从而使CU的安全容量增大,PNSC增大,如当PNSC=0.4时, $f_{BC}\tau_{BC}=0.35$ 比 $f_{BC}\tau_{BC}=0.2$ 、 $f_{BC}\tau_{BC}=0$ 下蜂窝链路的平均信噪比 w_c 分别恶化约1.2 dB、3 dB。

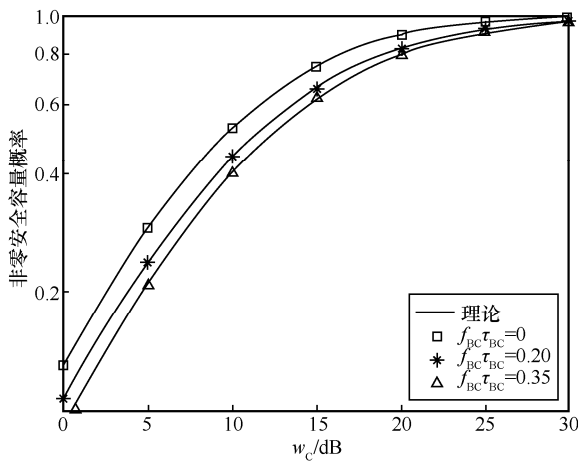


图3 不同 $f_{BC}\tau_{BC}$ 下D2D网络中CU的PNSC性能曲线

不同 w_E 下D2D网络中CU的PNSC性能曲线如图4所示。由图4可知:①窃听链路的平均信噪比 w_E 越大,CU的PNSC越小,这是由于增大 w_E 后,窃听信道容量增大,蜂窝链路信道容量不变,从而使CU的安全容量减小,PNSC减小,如当 $f_{RE}\tau_{RE}=0.2$ 、 $w_c=10$ dB时,若 w_E 从5 dB增大到15 dB,D2D网络中CU的PNSC从0.83减小到0.43;② $f_{RE}\tau_{RE}$ 越小,CU的PNSC越大,如当 $w_E=15$ dB、PNSC=0.4时, $f_{RE}\tau_{RE}=0.35$ 比 $f_{RE}\tau_{RE}=0.2$ 、 $f_{RE}\tau_{RE}=0$ 下蜂窝链路的平均信噪比 w_c 分别恶化了1.1 dB、3.1 dB。

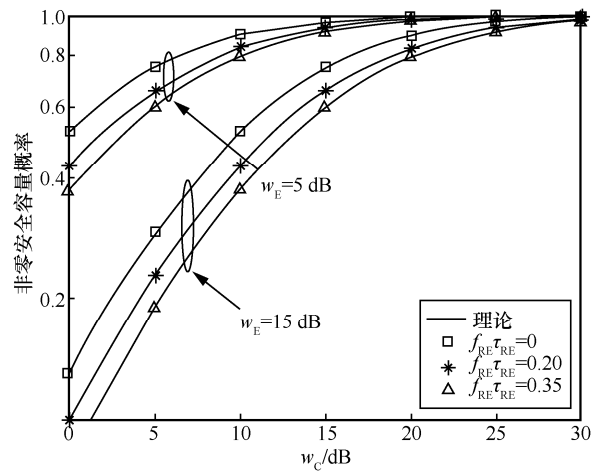
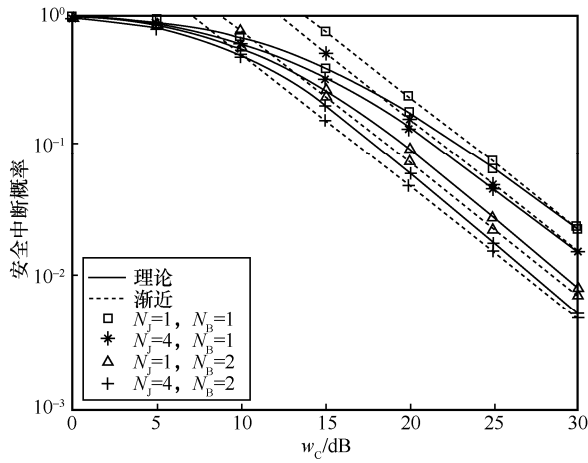
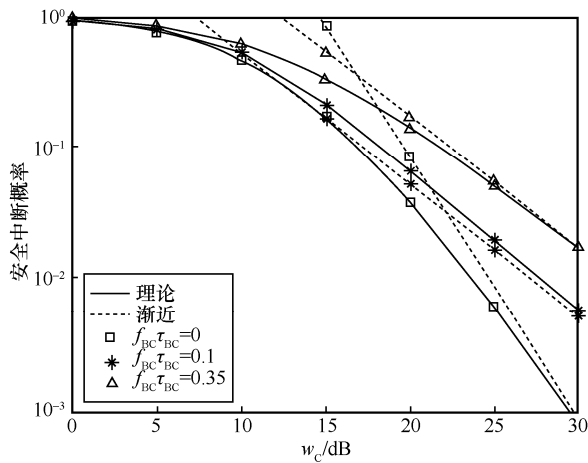


图4 不同 w_E 下D2D网络中CU的PNSC性能曲线

不同 N_B 和 N_j 下D2D网络中CU的SOP性能曲线如图5所示,其中 $w_E=5$ dB。由图5可知:① N_B 越大,CU的SOP越小,这是由于增大 N_B 后,蜂窝链路信道容量增大,窃听信道容量不变,从而使CU的安全容量增大,SOP减小,如当 $N_j=4$ 、 $w_c=25$ dB时,若 N_B 从1增加到2,CU的SOP从0.05减小到0.018;② N_j 越大,CU的SOP越小,这是由于增大 N_j 后,R对E的干扰增强,窃听信道容量减小,蜂窝链路信道容量不变,从而使CU的安全容量增大,SOP减小,如当 $N_B=2$ 、 $w_c=25$ dB时,若 N_j 从1增加到4,CU的SOP从0.03减小到0.018。

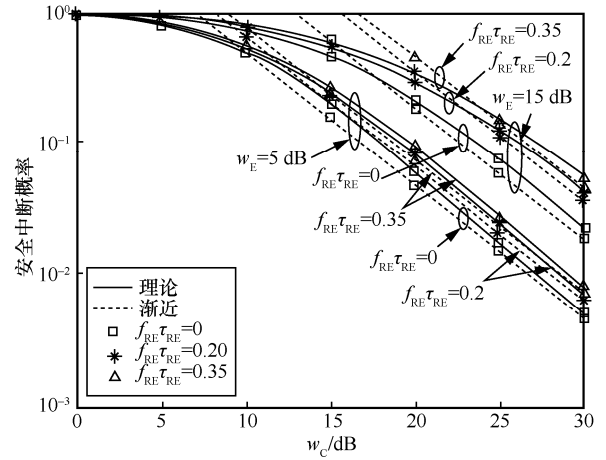
图5 不同 N_B 和 N_j 下 D2D 网络中 CU 的 SOP 性能曲线

不同 $f_{BC}\tau_{BC}$ 下 D2D 网络中 CU 的 SOP 性能曲线如图 6 所示, 其中 $w_E=5$ dB。由图 6 可知: ①蜂窝链路的平均信噪比 w_c 越大, 过时 CSI 下 CU 的 SOP 越小, 这是由于增大 w_c 后, 蜂窝链路信道容量增大, 窃听信道容量不变, 从而使 CU 的安全容量增大, SOP 减小; ②当 N_j 和 N_B 一定时, 蜂窝链路的 $f_{BC}\tau_{BC}$ 越小, 过时 CSI 下 CU 的 SOP 越小, 如当 $N_j=3$ 、 $N_B=2$ 、 $SOP=10^{-1}$ 时, $f_{BC}\tau_{BC}=0.35$ 比 $f_{BC}\tau_{BC}=0.1$ 、 $f_{BC}\tau_{BC}=0$ 下蜂窝链路的平均信噪比 w_c 分别恶化约 4.0 dB、5.1 dB。

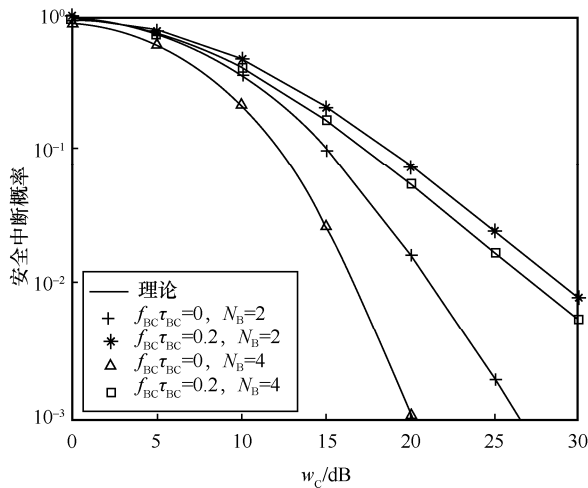
图6 不同 $f_{BC}\tau_{BC}$ 下 D2D 网络中 CU 的 SOP 性能曲线

不同 w_E 下 D2D 网络中 CU 的 SOP 性能曲线如图 7 所示。由图 7 可知: ①窃听链路的平均信

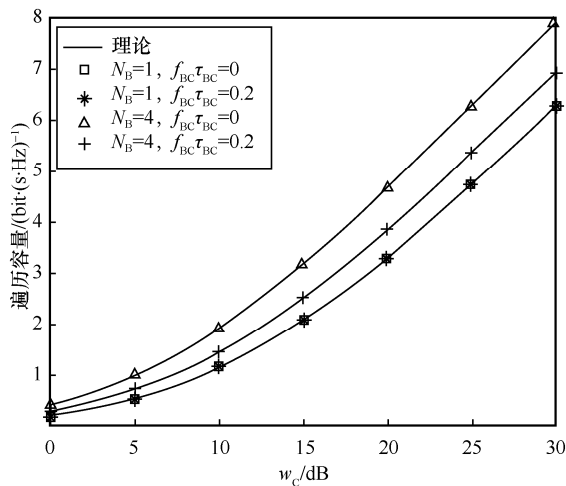
噪比 w_E 越大, CU 的 SOP 越大, 这是由于增大 w_E 后, 窃听信道容量增大, 蜂窝链路信道容量不变, 从而使 CU 的安全容量减小, SOP 增大, 如当 $f_{RE}\tau_{RE}=0.35$ 、 $w_c=25$ dB 时, w_E 从 5 dB 增加到 15 dB 时, CU 的 SOP 从 0.03 增加到 0.158; ② $f_{RE}\tau_{RE}$ 越小, CU 的 SOP 越小, 如当 $w_E=15$ dB、 $SOP=10^{-1}$ 时, $f_{RE}\tau_{RE}=0.35$ 比 $f_{RE}\tau_{RE}=0.2$ 、 $f_{RE}\tau_{RE}=0$ 下蜂窝链路所需的平均信噪比 w_c 分别恶化约 1.1 dB、2.9 dB; ③图 5、图 7 中高信噪比下 SOP 的渐近结果与精确值相一致, 从而验证了渐近理论推导的准确性。

图7 不同 w_E 下 D2D 网络中 CU 的 SOP 性能曲线

不同 N_B 下 D2D 网络中 CU 的中断性能曲线如图 8 所示。由图 8 可知: ① N_B 越大, 过时 CSI 下 CU 的中断概率越小, 这是由于增大 N_B 后, 蜂窝链路信道容量增大, 从而使得 CU 的中断概率减小, 如当 $f_{BC}\tau_{BC}=0.2$ 、 $w_c=15$ dB 时, N_B 从 2 增大到 4 时, CU 的中断概率从 0.215 减小到 0.167; ② $f_{BC}\tau_{BC}$ 越小, 越接近理想 CSI, CU 的中断概率越小, 这是由于减小 $f_{BC}\tau_{BC}$ 后, CU 的接收 SINR 增大, 蜂窝链路信道容量增大, 从而使 CU 的信道容量增大, 中断概率减小, 如当 $N_B=4$ 、中断概率为 10^{-1} 时, $f_{BC}\tau_{BC}=0.2$ 比 $f_{BC}\tau_{BC}=0$ 下蜂窝链路所需的平均信噪比 w_c 恶化约 4.0 dB。

图8 不同 N_B 下 D2D 网络中 CU 的中断性能曲线

不同 N_B 下 D2D 网络中 CU 的遍历容量性能曲线如图 9 所示。由图 9 可知：① N_B 越大，过时 CSI 下 CU 的遍历容量越大，这是由于增大 N_B 后，蜂窝链路信道容量增大，从而使得 CU 的遍历容量增大，如当 $f_{BC}\tau_{BC}=0.2$ 、 $w_c=20$ dB 时，若 N_B 从 1 增大到 4，CU 的遍历容量从 3.307 bit/(s·Hz) 增大到 3.856 bit/(s·Hz)；② $f_{BC}\tau_{BC}$ 越小，越接近理想 CSI，CU 的遍历容量越大，这是由于减小 $f_{BC}\tau_{BC}$ 后，蜂窝链路信道容量增大，从而使 CU 的遍历容量增大，如当 $N_B=4$ 、遍历容量为 4 bit/(s·Hz) 时， $f_{BC}\tau_{BC}=0.2$ 比 $f_{BC}\tau_{BC}=0$ 下蜂窝链路的平均信噪比 w_c 恶化约 2.2 dB。

图9 不同 N_B 下 D2D 网络中 CU 的遍历容量性能曲线

4 结束语

本文研究 D2D 链路和蜂窝链路均为过时 CSI 且为主动窃听的全双工中继辅助 D2D 网络中 CU 的可靠性、安全性，推导了其中断概率、遍历容量、非零安全容量概率、安全中断概率的解析表达式，并采用惠特克函数推导了 CU 渐近安全中断概率的精确解析表达式。根据数值计算和仿真结果可知：基站的发射天线数、中继的干扰天线数越多，CU 的安全性能越好；CSI 的反馈时延会恶化全双工中继辅助 D2D 网络中 CU 的可靠性、安全性。本文为快速、高效地分析全双工中继辅助 D2D 网络中 CU 的可靠性、安全性提供了一个有效的理论工具。此外，本文仅对瑞利衰落下全双工中继辅助 D2D 网络的性能展开研究，下一步将对其他衰落下全双工中继辅助 D2D 网络的性能进行研究。

参考文献：

- [1] 黄劲安, 曾哲君, 蔡子华, 等. 迈向 5G: 从关键技术到网络部署[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
HUANG J A, ZENG Z J, CAI Z H, et al. The road leading to 5G: key technologies and network deployment[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2018.
- [2] 范康康, 董颖, 钱志鸿, 等. D2D 通信的干扰控制和资源分配算法研究[J]. 通信学报, 2018, 39(11): 198-206.
FAN K K, DONG Y, QIAN Z H, et al. Research on the interference control and resource allocation in D2D communication[J]. Journal on Communications, 2018, 39(11): 198-206.
- [3] HUQ K M S, MUMTAZ S, RODRIGUEZ J. Outage probability analysis for device-to-device system[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2016:1-5.
- [4] HUSSAIN Z, MEHDI H, SALEEM S M A. Analysis of relay based D2D system with fluctuating beckmann fading[J]. Wireless Personal Communications, 2022, 124(2): 1457-1474.
- [5] NI Y Y, ZHAO J, WANG Y X, et al. Beamforming and interference cancellation for D2D communication assisted by two-way decode-and-forward relay node[J]. China Communications, 2018, 15(3): 100-111.
- [6] ZHANG G P, YANG K, LIU P, et al. Power allocation for full-duplex relaying-based D2D communication underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technol-

- ogy, 2015, 64(10): 4911-4916.
- [7] DANG S P, CHEN G J, COON J P. Outage performance analysis of full-duplex relay-assisted device-to-device systems in uplink cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 4506-4510.
- [8] 程英, 李光球, 沈静洁, 等. MF 中继选择系统的物理层安全性能[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 95-104.
- CHENG Y, LI G Q, SHEN J J, et al. Physical layer security performance of MF relay selection systems[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 95-104.
- [9] XU L W, ZHANG H. Joint TAS and power allocation for D2D cooperative networks[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2017, 10(4): 945-953.
- [10] XU L W, ZHANG H, WANG J J, et al. Joint TAS/SC and power allocation for IAF relaying D2D cooperative networks[J]. Wireless Networks, 2017, 23(7): 2135-2143.
- [11] PARVEZ S, SINGYA P K, BHATIA V. Ergodic capacity analysis of device-to-device MIMO relay system with imperfect CSI[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [12] WANG L, LIU J M, CHEN M K, et al. Optimization-based access assignment scheme for physical-layer security in D2D communications underlying a cellular network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 5766-5777.
- [13] LYU J W, WANG H M, HUANG K W. Physical layer security in D2D underlay cellular networks with Poisson cluster process[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(11): 7123-7139.
- [14] KHOSHAFAT M H, NGATCHED T M N, AHMED M H. Relay selection for improving physical layer security in D2D underlay communications[J]. IEEE Access, 2022(10): 95539-95552.
- [15] KHALID W, YU H, DO D T, et al. RIS-aided physical layer security with full-duplex jamming in underlay D2D networks[J]. IEEE Access, 2021(9): 99667-99679.
- [16] MOUALEU J M, NGATCHED T M N. Physical-layer security enhancement via relay-aided D2D communications underlying cellular networks[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020(1): 413-427.
- [17] 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): 53575-53586.
- [18] KHOSHAFAT M H, NGATCHED T M N, AHMED M H. On the physical layer security of underlay relay-aided device-to-device communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 7609-7621.
- [19] 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.
- [20] HUANG Y Z, AL-QAHTANI F S, DUONG T Q, et al. Secure transmission in MIMO wiretap channels using general-order transmit antenna selection with outdated CSI[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(8): 2959-2971.
- [21] GRADSHTEIN I S, RYZHIK I M, JEFFREY A, et al. Table of integrals, series and products(7th ed)[M]. Oxford: Academic Press, 2007.
- [22] ZHAO R, LIN H X, HE Y C, et al. Secrecy performance of transmit antenna selection for MIMO relay systems with outdated CSI[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(2): 546-559.
- [23] DO D T, NGUYEN M S. Outage probability and ergodic capacity analysis of uplink NOMA cellular network with and without interference from D2D pair[J]. Physical Communication, 2019(37): 100898.

[作者简介]



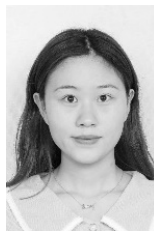
沈静洁 (1996—), 女, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。



李光球 (1966—), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院教授, 主要研究方向为无线通信、信息论与编码等。



罗延翠 (1998—), 女, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。



刘会芝 (1997—), 女, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。