

移动协作通信网络的物理层安全性能研究

徐凌伟^{1,2} 于旭¹ 林文忠²

(1. 青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266061;

2. 闽江学院 福建省信息处理与智能控制重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要 随着第五代移动通信技术的发展,移动协作通信网络成为学术界研究的热点问题.但是由于完全开放的信道,移动协作通信网络的物理层安全研究非常复杂,也是一个亟待解决的问题.本文在 N -Nakagami 信道下,研究了移动协作通信网络的安全性能.针对平均安全容量和安全中断概率,分别推导了精确闭式表达式,然后在不同条件下,通过 Monte-Carlo 仿真,对系统的安全性能做了验证分析.仿真结果表明:理论值与 Monte-Carlo 仿真值有着很好的吻合,理论分析的正确性得到了验证.

关键词 移动协作通信网络;物理层安全;安全容量;安全中断概率

中图分类号 TN929.5

文献标识码 A

0 引言

近年来,随着第五代移动通信技术的发展,国内外广泛的研究移动协作通信网络^[1-3].伴随着移动物联网业务的发展,可以真正实现“万物互联”^[4,5].但是由于完全开放的信道,移动协作通信网络的物理层安全面临严峻的挑战^[6].国内外学术界在各个方面对物理层安全技术展开了分析研究^[7-9].协作通信技术是一种提高物理层安全性能的有效方法.南京邮电大学的邹玉龙团队提出了新的中继选择策略,并推导出相应的安全截获概率^[10].浙江工业大学的余昌盛等人利用中继节点地放大转发、协作拥塞及联合协作保障物理层安全^[11].澳大利亚国立大学的 N. Yang 等人分析研究了基于 Rayleigh 信道的多天线通信系统的安全性能^[12].重庆大学的雷宏江等人研究了基于 Generalized-K 信道的多天线系统的物理层安全性能^[13].

现有的研究都是针对 Rayleigh, Nakagami 等信道.但是 Rayleigh, Nakagami 等信道对实际环境中的移动通信信道不能实现很好的动态体现^[14]. N -Nakagami 信道能够更灵活地表征无线移动信道衰落特征,也更符合实际移动通信环境.所以本文在 N -Nakagami 信道下,建立了移动协作通信网络模型.为了能够量化地分析系统的安全性能,我们针对平均安全容量(Average Secrecy Capacity, ASC)和安全中断概率(Secrecy Outage Probability, SOP),分别推导了精确的闭式表达式.最后在不同条件下,通过 Monte-Carlo 仿真,对系统的安全性能做了验证分析.本文的理论研究具有很高的准确性,还能够方便地应用到大规模移动通信网络的性能计算和分析中.

1 系统模型

图 1 给出了移动协作通信网络模型.移动信源(S)节点通过一个移动中继节点(R)发送信息给移动合法目的端(D)节点,同时会被移动窃听者(E)节点通过窃听信道获取.它们的通信信道是 N -Nakagami 信道. Rayleigh, Nakagami 等信道适合于固定通信,对实际的移动通信不能实现很好地动态体现.和 Rayleigh, Nakagami 等信道相比, N -Nakagami 信道能够更灵活地表征无线移动信道衰落特征,适用范围更加广泛,所以移动协作通信网络模型也更具有代表性.

收稿日期:2018-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(61671261);山东省自然科学基金项目(ZR2017BF023);福建省信息处理与智能控制重点实验室(闽江学院)开放课题基金(MJUKF-IPIC201806);山东省博士后创新项目(201703032)资助

通讯作者:徐凌伟,男,汉族,博士,副教授,研究方向:推荐系统、数据挖掘、移动通信、深度学习, E-mail: gaomilaojia2009@163.com.

我们定义 $h = h_{sg}, g \in \{SR, RD, RE\}$, 表示 $S \rightarrow R, R \rightarrow D, R \rightarrow E$ 链路的信道增益. S 和 R 的发射总功率为 E . 为了表示 R 与 S, D, E 的相对位置, 我们分别用 V_{SR}, V_{RD}, V_{RE} 表示 $S \rightarrow R, R \rightarrow D, R \rightarrow E$ 链路的位置增益. 在第一个时隙, S 发送信号 x, R 接收信号表示为

$$r_{SR} = \sqrt{V_{SR}KE}h_{SR}x + n_{SR}, \quad (1)$$

其中 K 表示功率分配系数, n_{SR} 的均值和方差分别为 0 和 $N_0/2$.

在第二个时隙, R 使用放大转发策略发送信号. 在 D 和 E 处, 接收信号 $r_{Rk}, k \in \{D, E\}$, 表示为

$$r_{Rk} = \sqrt{c_k E}h_{SR}h_{Rk}x + n_{Rk}, \quad (2)$$

$$c_k = \frac{K(1-K)V_{SR}V_{Rk}E/N_0}{1 + KV_{SR}E/N_0 + (1-K)V_{Rk}|h_{Rk}|^2E/N_0} = \frac{K(1-K)V_{SR}V_{Rk}\bar{\gamma}}{1 + KV_{SR}\bar{\gamma} + (1-K)V_{Rk}|h_{Rk}|^2\bar{\gamma}}, \quad (3)$$

其中 n_{Rk} 的均值和方差分别为 0 和 $N_0/2$. 接收信噪比 γ_{SRk} 表示为

$$\gamma_{SRk} = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{Rk}}{1 + \gamma_{SR} + \gamma_{Rk}}, \quad (4)$$

其中

$$\gamma_{SR} = \frac{V_{SR}K|h_{SR}|^2E}{N_0} = V_{SR}K|h_{SR}|^2\bar{\gamma}, \quad (5)$$

$$\gamma_{Rk} = (1-K)V_{Rk}|h_{Rk}|^2\bar{\gamma}, \quad (6)$$

$$\bar{\gamma}_{SR} = V_{SR}K\bar{\gamma}, \quad (7)$$

但是 γ_{SRk} 的概率密度函数是很难得到的. 因此, 我们获得了 γ_{SRk} 的近似值为

$$\gamma_k = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{Rk}}{1 + \gamma_{SR} + \gamma_{Rk}}, \quad (8)$$

$$\bar{\gamma}_{Rk} = (1-K)V_{Rk}\bar{\gamma}, \quad (9)$$

为了得到 γ_k 的概率密度函数和累积分布函数, 我们定义了两个变量

$$Z = \gamma_{SR}\gamma_{Rk}, \quad (10)$$

$$W = \gamma_k = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{Rk}}{1 + \gamma_{SR} + \gamma_{Rk}}. \quad (11)$$

先推导 Z 的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_Z(z) &= \int_0^\infty \frac{1}{x} f_{SR}(x) f_{Rk}\left(\frac{z}{x}\right) dx \\ &= \frac{1}{z \prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j)} \times \int_0^\infty \frac{1}{x} G_{0,N}^{N,0} \left[\frac{x}{\gamma_{SR}} \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \middle| \bar{m}_1, \dots, \bar{m}_n \right] G_{0,N}^{N,0} \left[\frac{z}{x \gamma_{Rk}} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \middle| \bar{m}_1, \dots, \bar{m}_n \right] dx, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $G()$ 表示 Meijer's G 函数, m 表示衰弱系数, $\Omega = E[|h|^2]$, $E[\cdot]$ 表示求均值.

利用文献[15]的方法

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty x^{a-1} G_{u,v}^{s,t} \left[\sigma x \left| \begin{matrix} c_1, \dots, c_u \\ d_1, \dots, d_v \end{matrix} \right. \right] G_{p,h}^{m,n} \left[\omega x^{\frac{1}{k}} \left| \begin{matrix} e_1, \dots, e_p \\ f_1, \dots, f_h \end{matrix} \right. \right] dx \\ &= \frac{k^\phi l^{\theta+a(v-u)-1} \sigma^{-a}}{(2\pi)b^* (e-1) + c^* (k-1)} G_{kp+lv, kn+lu}^{km+h, km+k} \left[\frac{\omega^k k^{k(p-h)}}{\sigma^k l^{l(u-v)}} \left| \begin{matrix} \Delta(k, e_1), \dots, \Delta(k, e_n), \\ \Delta(k, f_1), \dots, \Delta(k, f_m), \\ \Delta(l, 1-\alpha-d_1), \dots, \Delta(l, 1-\alpha-d_v), \Delta(k, e_{n+1}), \dots, \Delta(k, e_p), \\ \Delta(l, 1-\alpha-c_1), \dots, \Delta(l, 1-\alpha-c_u), \Delta(k, f_{m+1}), \dots, \Delta(k, f_h) \end{matrix} \right. \right], \end{aligned} \quad (13)$$

其中变量 m, n, s, t, u, v, p, h 分别表示进行不同运算的变量个数, 取值为任意的正整数, l, k 为任意的正整数, c_i, d_i, e_i, f_i 为任意的实数变量.

$$b^* = s + t - \frac{u+v}{2}, c^* = m + n - \frac{p+q}{2}, \varphi = \sum_{i=1}^p b_i - \sum_{i=1}^q b_i + \frac{p-q}{2} + 1, \theta = \sum_{i=1}^v d_i - \sum_{i=1}^u c_i + \frac{u-v}{2} + 1, \quad (14)$$

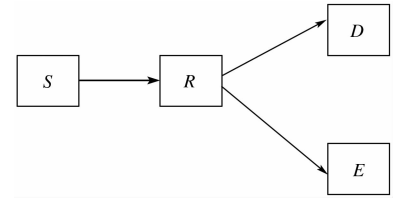


图1 移动协作通信网络模型

$$\Delta(k, a) = \frac{a}{k}, \frac{a+1}{k}, \dots, \frac{a+k-1}{k}.$$

我们得到

$$f_z(z) = \frac{1}{z \prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j)} \times G_{0,2N}^{2N,0} \left[\frac{z}{\gamma_{SR} \gamma_{Rk}} \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{2N} \end{matrix} \right]. \quad (15)$$

由(11)得到

$$Z = W(1 + \overline{\gamma_{SR}} + \overline{\gamma_{Rk}}). \quad (16)$$

因此 W 的概率密度函数为

$$f_W(w) = f_z(w) \frac{dz}{dw} = \frac{1}{w \prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j)} \times G_{0,2N}^{2N,0} \left[\frac{w}{\chi^k} \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_m \end{matrix} \right], \quad (17)$$

$$\chi^k = \frac{\overline{\gamma_{SR}} \overline{\gamma_{Rk}}}{1 + \overline{\gamma_{SR}} + \overline{\gamma_{Rk}}}. \quad (18)$$

因此我们也就得到了 γ_k 的概率密度函数的闭合表达式

$$f_{\gamma_k}(r) = \frac{1}{r \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} G_{0,2N}^{2N,0} \left[\frac{r}{\chi^k} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_m \end{matrix} \right]. \quad (19)$$

利用文献[15]的方法

$$\begin{aligned} F(r_{th}) &= \int_0^{r_{th}} f(r) dr = \frac{1}{\prod_{j=1}^N \Gamma(m_j)} \int_0^{r_{th}} \frac{1}{r} G_{0,2N}^{2N,0} \left[\frac{r}{\gamma} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{N,0} \end{matrix} \right] dr \\ &= \frac{1}{\prod_{j=1}^N \Gamma(m_j)} G_{1,2N+1}^{N,1} \left[\frac{r_{th}}{\gamma} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{N,0} \end{matrix} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

对(19)进行积分,我们就得到了累积分布函数的闭合表达式为

$$F_{\gamma_k}(r) = \frac{1}{\prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} G_{1,2N+1}^{2N,1} \left[\frac{r}{\chi^k} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{2N,0} \end{matrix} \right]. \quad (21)$$

2 系统安全性能分析

2.1 平均安全容量

瞬时安全容量定义为^[16]

$$C_S = \max\{\ln(1 + \gamma_D) - \ln(1 + \gamma_E), 0\}, \quad (22)$$

因此 ASC 可以表示为

$$\begin{aligned} \overline{C_S} &= \int_0^\infty \int_0^\infty C_S(\gamma_D, \gamma_E) f(\gamma_D, \gamma_E) d\gamma_D d\gamma_E = \int_0^\infty \ln(1 + \gamma_D) f_{SRAD}(\gamma_D) F_{SRAE}(\gamma_D) d\gamma_D \\ &\quad + \int_0^\infty \ln(1 + \gamma_E) f_{SRAE}(\gamma_E) F_{SRAD}(\gamma_E) d\gamma_E - \int_0^\infty \ln(1 + \gamma_E) f_{SRAE}(\gamma_E) d\gamma_E = Q_1 + Q_2 - Q_3, \end{aligned} \quad (23)$$

利用文献[17]的方法, Q_1 表示为

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{ii=1}^N \Gamma(m_{ii}) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} \\ &\quad \times \int_0^\infty \ln(1 + \gamma_D) \frac{1}{\gamma_D} G_{0,2N}^{2N,0} \left[\frac{\gamma_D}{\chi_D} \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{ii=1}^N \frac{m_{ii}}{\Omega_{ii}} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{2N} \end{matrix} \right] G_{1,2N+1}^{2N,1} \left[\frac{\gamma_D}{\chi_E} \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{2N,0} \end{matrix} \right] d\gamma_D \\ &= \frac{1}{\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{ii=1}^N \Gamma(m_{ii}) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} \times \int_0^\infty G_{2,2}^{1,2} \left(\gamma_D \middle| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\gamma_D} G_{0,2N}^{2N,0} \left[\begin{matrix} \gamma_D \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{ii=1}^N \frac{m_{ii}}{\Omega_{ii}} \\ \chi^D \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{ii=1}^N \frac{m_{ii}}{\Omega_{ii}} \end{matrix} \middle| m_1, \dots, m_{2N} \right] G_{1,2N+1}^{2N,1} \left[\begin{matrix} \gamma_E \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}} \\ \chi^E \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}} \end{matrix} \middle| m_1, \dots, m_{2N} \right] d\gamma_D \\
&= \frac{1}{\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{ii=1}^N \Gamma(m_{ii}) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} \times G_{2,2;0,2N;1,2N+1}^{2,1;2N,0;2N,1} \left[\begin{matrix} 0, 1 \\ 0, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{2N} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_{2N}, 0 \end{matrix} \right] \\
& \frac{1}{\chi^D \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{ii=1}^N \frac{m_{ii}}{\Omega_{ii}}}, \frac{1}{\chi^E \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}}} \Big],
\end{aligned}$$

Q_2 表示为

$$\begin{aligned}
Q_2 &= \frac{1}{\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{ii=1}^N \Gamma(m_{ii}) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} \times G_{2,2;0,2N;1,2N+1}^{2,1;2N,0;2N,1} \left[\begin{matrix} 0, 1 \\ 0, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} - \\ m_1, \dots, m_{2N} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1 \\ m_1, \dots, m_{2N}, 0 \end{matrix} \right] \\
& \frac{1}{\chi^E \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}}}, \frac{1}{\chi^D \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{ii=1}^N \frac{m_{ii}}{\Omega_{ii}}} \Big], \tag{25}
\end{aligned}$$

Q_3 表示为

$$Q_3 = \frac{1}{\prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} G_{2,2N+2}^{2N+2,1} \left[\begin{matrix} \frac{1}{\chi^E \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}}} \\ \chi^E \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}} \end{matrix} \middle| 0, 1 \right. \tag{26}$$

2.2 安全中断概率

F_{SOP} 表示为^[18]

$$F_{SOP} = \Pr(C_S(\gamma_D, \gamma_E) < \gamma_{th}) = \Pr(\gamma_D < \beta\gamma_E + \beta - 1) = \int_0^\infty F_{SRAD}(\beta\gamma_E + \beta - 1) f_{SRAE}(\gamma_E) d\gamma_E, \tag{27}$$

$$\beta = \exp(\gamma_{th}), \tag{28}$$

其中 γ_{th} 是安全中断阈值. 在(18)式中, 含有复杂的 Meijer's G 函数, 闭式解很难得到. 我们推导了其下界的闭合表达式

$$\begin{aligned}
F_{SOPL} &= \Pr(\gamma_D < \beta\gamma_E) = \int_0^\infty F_{SRAD}(\beta\gamma_E) f_{SRAE}(\gamma_E) d\gamma_E = \frac{1}{\prod_{i=1}^N \Gamma(m_i) \prod_{ii=1}^N \Gamma(m_{ii}) \prod_{j=1}^N \Gamma(m_j) \prod_{jj=1}^N \Gamma(m_{jj})} \\
& \times G_{2N+1,2N+1}^{2N,2N+1} \left[\begin{matrix} \beta\chi^E \prod_{i=1}^N \frac{m_i}{\Omega_i} \prod_{ii=1}^N \frac{m_{ii}}{\Omega_{ii}} \\ \chi^D \prod_{j=1}^N \frac{m_j}{\Omega_j} \prod_{jj=1}^N \frac{m_{jj}}{\Omega_{jj}} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, 1 - m_1, \dots, 1 - m_{2N} \\ m_1, \dots, m_{2N}, 0 \end{matrix} \right]. \tag{29}
\end{aligned}$$

3 系统安全性能分析流程

本论文面向复杂移动通信场景, 研究了移动协作通信网络模型建立、移动协作通信网络安全性能的准确高效求解, 最后利用数值仿真验证了所建立网络模型. 各项研究内容的关系如图 2 所示.

4 数值仿真

仿真环境: 台式电脑拥有 4GHz CPU 和 4GB 内存, 操作系统是 Windows 7, 程序软件是 Matlab 2010b. 我们定义 $u = V_{RD}/V_{RE}$ 为相对位置增益, $E=1$, $\bar{\gamma} = 10$ dB, 每次仿真参数设定为 10000 次.

在图 3 中, 我们分析了信道参数 N 对 ASC 性能的影响. 仿真系数如表 1 所示. 由图 3 可知, 当 $u < 0$ dB, ASC 性能在 4-Nakagami 信道下是最好的; 当 $u > 0$ dB, ASC 性能随着 N 的增加而不断减弱. 这是因为, u 越大, MD 比 ME 更靠近 MS, 合法目的端的通信质量也更好; N 越大, N -Nakagami 信道的衰弱程度越大, 通信质量越差. 当 $u < 0$ dB, ME 比 MD 更靠近 MS, 所以 N 越大, 窃听信道的衰弱程度越大, 窃听者的通信质量越差, 系统的 ASC 性能越好; 当 $u > 0$ dB, MD 比 ME 更靠近 MS, 所以 N 越小, 合法信道的衰弱程度越小, 合

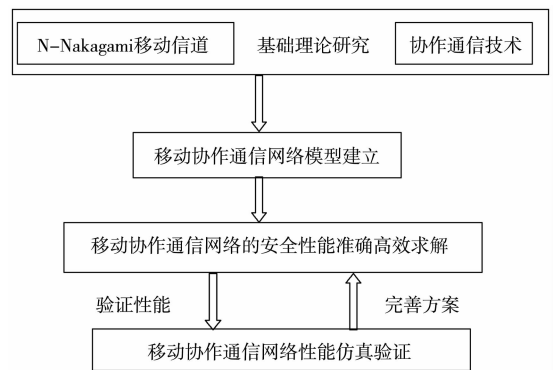


图 2 本论文各项研究内容之间的关系

法目的端的通信质量也更好,系统的 ASC 性能越好.当 N 固定时,增大 u 可以改善 ASC 性能.

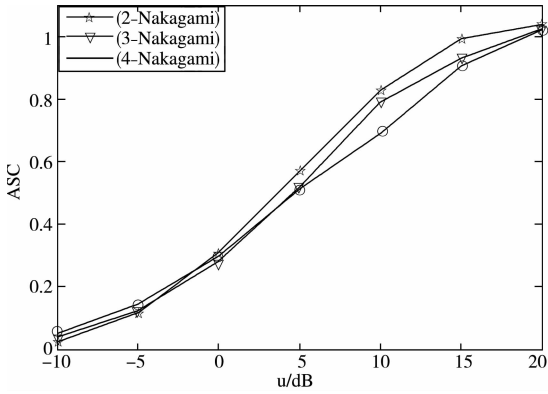


图 3 N 对 ASC 性能的影响

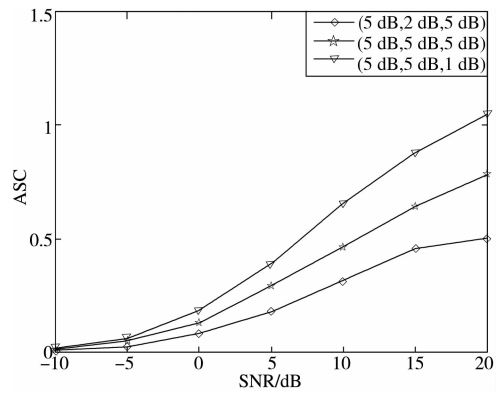


图 4 (V_{SR}, V_{RD}, V_{RE}) 对 ASC 性能的影响

图 4 分析了 (V_{SR}, V_{RD}, V_{RE}) 对 ASC 性能的影响.仿真系数如表 2 所示.由图 4 可知,当信噪比 SNR 固定时,增加 V_{RD} ,减少 V_{RE} ,可以改善 ASC 性能.当 (V_{SR}, V_{RD}, V_{RE}) 为 $(5 \text{ dB}, 5 \text{ dB}, 2 \text{ dB})$ 时,ASC 性能是最好的.这是因为增加 V_{RD} 意味着 MD 比 ME 更靠近 MS,合法目的端的通信质量比窃听器更好.当 SNR 不断增加时,ASC 性能是不断改善的.增加信噪比意味着 $MS \rightarrow MR \rightarrow MD$ 链路比 $MS \rightarrow MR \rightarrow ME$ 链路通信质量好.

表 2 仿真系数

参数	数值
m_{SR}	2
m_{RE}	1
m_{RD}	2
N_{SR}	2, 3, 4
N_{RE}	2, 3, 4
N_{RD}	2, 3, 4

参数	数值		
V_{SR}	5 dB	5 dB	5 dB
V_{RD}	2 dB	5 dB	5 dB
V_{RE}	5 dB	5 dB	2 dB
m_{RD}	2	2	2
m_{RE}	2	2	2
N_{SR}	2	2	2
N_{RD}	2	2	2
N_{RE}	2	2	2

参数	数值
m_{SR}	1, 2, 3
m_{RE}	1, 2, 3
m_{RD}	1, 2, 3
N_{SR}	2
N_{RE}	2
N_{RD}	2

在图 5 中,我们分析了信道参数 m 对 ASC 性能的影响.仿真系数如表 3 所示.由图 5 可知,当 u 逐渐增大时,MD 比 ME 更靠近 MS; m 越大, N -Nakagami 信道的衰弱程度越小,通信质量越好.所以 u 越大, m 越

系统的 ASC 性能越好.当 m 固定时,增大 u 可以改善 ASC 性能.在图 6 中,我们分析了 SOP 性能的下界.仿真系数如表 4 所示.安全中断阈值 $\gamma_{th} = 0 \text{ dB}$.大,由图 6 可知,增大 u 的取值, Monte-Carlo 仿真值不断的接近下界理论值,验证了我们理论分析的正确性.当 $u > 20 \text{ dB}$, Monte-Carlo 仿真值和理论值拟合的非常好.

表 4 仿真系数

参数	场景 1	场景 2	场景 3
m_{SR}	2	2	2
m_{RD}	2	1	1
m_{RE}	1	1	2
N_{SD}	2	2	2
N_{SR}	2	2	2
N_{RD}	2	2	2

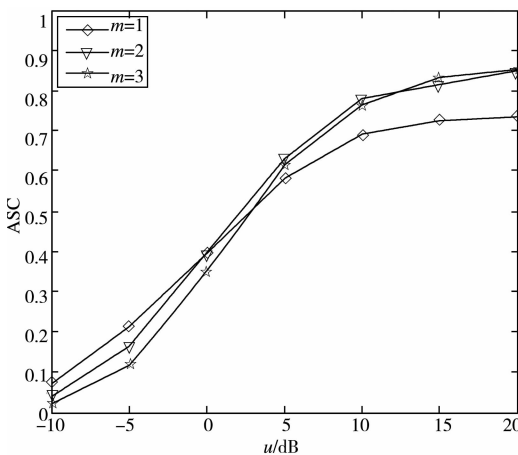


图 5 m 对 ASC 性能的影响

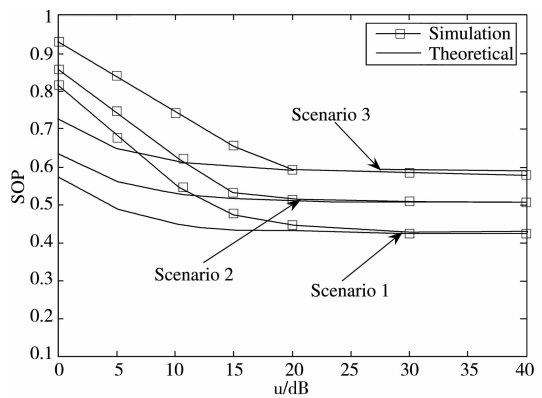


图 6 SOP 的下限值

5 结论

本文在 N -Nakagami 信道下,研究了移动协作通信网络的物理层安全性能. 基于移动协作通信网络模型,分别推导了 ASC 和 SOP 的精确表达式. 然后在不同条件下,通过 Monte-Carlo 仿真,对系统的安全性能做了验证分析. 同时,我们分析了不同信道参数对系统安全性能的影响. 下一步考虑将本文方法应用在实际安全问题中,用以全面衡量系统的安全性能. 此外,针对不同的信道参数,继续分析他们对系统安全性能的影响.

参 考 文 献

- [1] 张平,陶运铮,张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报,2016,37(7):15-29.
- [2] 李慧嘉,李爱华,李慧颖. 社团结构迭代快速探测算法[J]. 计算机学报,2017,40(4):970-984.
- [3] 李慧嘉,严冠,刘志东,等. 基于动态系统的网络社团线性探测算法[J]. 中国科学:数学,2017,47(2):241-256.
- [4] 李俊青. 求解分布式装配式建筑逆向物流问题的离散人工蜂群算法[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2018,31(2):102-109.
- [5] 李慧嘉,贾传亮,余廉. 基于本体关联网络的非常规突发事件案例快速提示方法[J]. 运筹与管理,2017,26(12):68-76.
- [6] 田野,袁博,李廷力. 物联网海量异构数据存储与共享策略研究[J]. 电子学报,2016,44(2):247-257.
- [7] 李慧嘉,李慧颖,李爱华. 多尺度的社团结构稳定性分析[J]. 计算机学报,2015,38(2):301-312.
- [8] 范红,邵华,李海涛. 物联网安全技术实现与应用[J]. 信息安全,2017,17(9):38-41.
- [9] 赵阔,邢永恒. 区块链技术驱动下的物联网安全研究综述[J]. 信息安全,2017,17(5):1-6.
- [10] Zou Y L, Champagne B, Zhu W P, et al. Relay-selection improves the security-reliability trade-off in cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(1):215-228.
- [11] 余昌盛,俞立,洪榛,等. 基于放大转发和协作拥塞的窄带物联网物理层安全容量研究[J]. 传感技术学报,2017,30(4):575-581.
- [12] Yang N, Yeoh P L, El-kashlan M, et al. MIMO wiretap channels: Secure transmission using transmit antenna selection and receive generalized selection combining[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9):1754-1757.
- [13] Lei H J, Gao C. On physical layer security over SIMO generalized-K fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9):7780-7785.
- [14] Karagiannidis G K, Sagias N C, Mathiopoulos P T. N^* Nakagami: a novel stochastic model for cascaded fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(8):1453-1458.
- [15] Adamchik V S, Marichev O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in reduce system [C]. // Proceeding of 1990 IEEE Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, Tokyo, Japan: IEEE Press, 1990.
- [16] Bloch M, Barros J. Wireless information-theoretic security[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(6):2515-2534.
- [17] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, Products[M]. 5th ed. San Diego: Academic Press, 1994.
- [18] Lei H J, Zhang H, Ansari I S, et al. Performance analysis of physical layer security over generalized-K fading channels using a mixture Gamma distribution[J]. IEEE Communication Letters, 2016, 20(2):408-411.

Physical Layer Security Performance Analysis of Mobile Cooperative Communication Network

XU Ling-wei^{1,2} YU Xu¹ LIN Wen-zhong²

(1. School of Information Science & Technology, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Information Processing and Intelligent Control, Minjiang University, Fuzhou 350108, China

Abstract With the development of the fifth generation mobile communication technology, the mobile cooperative communication network has become a hot issue of academic researches. Due to the openness of wireless channels, the physical layer security research of the mobile cooperative communication network is very complicated, and a urgent problem to be solved. In this work, the secrecy performance of the mobile cooperative communication network over N -Nakagami fading channels is investigated. The exact closed-form expressions for the average secrecy capacity and secrecy outage probability are derived. Then through Monte-Carlo simulations, the secrecy performance under different conditions is verified. Simulation results show that: the analytical results match perfectly with the Monte-Carlo simulation results, which verifies the accuracy of the analytical results.

Key words mobile cooperative communication network; physical layer security; secrecy capacity; secure outage probability