



多中继与多用户选择的中继系统安全性能分析

任婷洁, 李光球, 程英

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了考察使用多中继选择与多用户选择的放大转发 (AF) 中继系统的物理层安全性能, 推导了其在瑞利衰落信道上和联合发送天线选择/接收最大比合并天线分集下的非零安全容量概率和安全中断概率的精确表达式以及在高信噪比下的渐近安全中断概率解析表达式。AF 中继系统的非零安全容量概率和安全中断概率的数值计算和仿真结果相吻合, 验证了以上理论分析的正确性; 分析结果表明, 其安全分集增益为源节点发射天线数、最优中继节点接收天线数、中继节点数的三者乘积与最优中继节点发射天线数、最优用户接收天线数、用户数三者乘积之间的最小值, 且与窃听信道无关。

关键词: 发送天线选择; 最大比合并; 放大转发; 中继选择; 物理层安全

中图分类号: TN918

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019153

Secure performance analysis of relay systems with multi-relay and multi-user selection

REN Tingjie, LI Guangqiu, CHENG Ying

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

Abstract: The exact expressions for the non-zero secrecy capacity probability, secrecy outage probability of AF relay systems with transmit antenna selection and receive maximal ratio combining and its asymptotic secrecy outage probability at high signal to noise ratios over Rayleigh fading channel were derived respectively. The numerical results of the non-zero secrecy capacity probability and secrecy outage probability of AF relay systems with multi-relay and multi-user selection match well with their corresponding simulations, which proves the correctness of the above theoretical analysis. The analysis result of the asymptotic secrecy outage probability of AF relay systems with multi-relay and multi-user selection indicates that its secrecy diversity gain is the minimum value between the product of the number of transmit antennas at source, the number of receive antennas at the optimal relay node, and the number of relay nodes, and the product of the number of transmit antennas at the optimal relay node, the number of receive antennas at the optimal destination node, and the number of destination nodes, which is independent of the eavesdropper channel.

Key words: transmit antenna selection, maximal ratio combining, amplify-and-forward, relay selection, physical layer security

收稿日期: 2019-02-16; 修回日期: 2019-05-22

通信作者: 李光球, gqli@hdu.edu.cn

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY12F01008)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY12F01008)



1 引言

多中继选择或多用户选择无线通信系统的物理层安全性能研究已受到了广泛的关注^[1-9]。参考文献[1]推导了瑞利衰落信道上采用中继选择的两跳 AF (amplify-and-forward, 放大转发) 系统的安全中断概率的上下限及其近似表达式。参考文献[2]推导了瑞利衰落信道上采用最优中继选择方案的 AF 系统的安全中断概率和安全分集增益的精确解析表达式。参考文献[3]推导了瑞利衰落信道上两跳 AF 中继系统在 3 种机会中继选择方案下的遍历安全容量表达式。参考文献[4]推导了在独立不同分布的瑞利衰落信道上采用最佳中继选择的两跳 AF 系统的安全中断概率的精确及近似解析表达式。参考文献[5]推导了瑞利衰落信道上多窃听者场景下基于过时 CSI (channel state information, 信道状态信息) 的 AF 部分中继选择系统的安全中断概率的精确及近似解析表达式。参考文献[6]推导了瑞利衰落信道上多窃听者场景下两种不同中继选择方案的 AF 系统在过期 CSI 下的安全中断概率的近似及其渐近解析表达式。参考文献[7]推导了瑞利衰落信道上存在干扰信号的场景下, 基于过时 CSI 的两跳 AF 机会中继选择系统的遍历安全容量和安全中断概率的下限表达式。参考文献[8]推导了瑞利衰落信道上存在反馈时延的多中继选择和多用户选择 AF 系统的安全中断概率的下限解析表达式。参考文献[9]推导了多窃听者场景下 3 种多中继选择和多用户选择方案下的 AF 系统安全中断概率的近似及其渐近表达式。

在无线资源日趋紧张的情况下, 采用多天线技术可充分挖掘利用空间无线资源^[10], 其中, TAS (transmit antenna selection, 发送天线选择) 技术可以提高多天线无线通信系统的物理层安全性能^[11-13]。参考文献[11]推导了 Nakagami- m 衰落信道上发送端采用 TAS 技术的无线通信系

统非零安全容量概率、安全中断概率的精确解析表达式及其安全中断概率的渐近表达式。参考文献[12]推导了瑞利衰落信道上中继节点采用 TAS 技术的 AF 系统的安全中断概率的精确表达式。参考文献[13]推导了相关衰落信道上采用 TAS 技术和中继选择策略的两跳 AF 系统的安全中断概率的近似解析表达式及其渐近表达式。采用 TAS/MRC (maximum ratio combining, 最大比合并) 天线分集技术可提高 MIMO (multiple input multiple output, 多入多出) 无线通信系统的误码性能^[14], 经分析, 采用 TAS/MRC 可进一步增大 MIMO 无线通信系统的安全分集增益^[15-16]。参考文献[15]推导了相关瑞利衰落信道上存在反馈时延的 TAS/MRC 天线分集无线通信系统的非零安全容量概率和安全中断概率的解析表达式。参考文献[16]推导了 Nakagami- m 衰落信道上多窃听者场景下采用 TAS/MRC 天线分集的 MIMO 无线通信系统的非零安全容量概率和安全中断概率的解析表达式。若将 TAS/MRC 天线分集技术应用于多中继选择与多用户选择 MIMO 中继系统, 则可改善其物理层安全性能, 下面拟用非零安全容量概率、安全中断概率以及在高信噪比下的渐近安全中断概率等性能指标对其进行研究, 探索源节点发射天线数、中继节点天线数、中继节点数、目的节点数以及目的节点和窃听节点的接收天线数是如何影响其安全性能的。

2 系统模型

考虑瑞利衰落信道上采用 TAS/MRC 天线分集的多中继选择与多用户 (目的节点) 选择的 MIMO AF 中继系统在单窃听者场景下的物理层安全模型, 如图 1 所示。假定: 源节点 S 配置 N_1 根发射天线, 中继节点 R_m ($1 \leq m \leq M_1$) 均配置 N_2 根接收天线和 N_2 根发射天线, 目的节点 D_n ($1 \leq n \leq M_2$) 均配置 N_3 根接收天线, 被动窃听

节点 E 配置 N_4 根接收天线；源节点与 M_2 个目的节点以及窃听节点之间均无直达链路；源节点 S 的发送功率 ε_s 与每个中继节点的发送功率 ε_R 相等，即 $\varepsilon_s = \varepsilon_R$ ； R_m 、 D_n 和 E 的每根接收天线上的 AWGN (additive white Gaussian noise, 加性高斯白噪声) 均相互独立，且均服从复高斯 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 分布，其中 N_0 表示 AWGN 的单边功率谱密度；每个中继节点的每根接收天线上的平均信噪比均相同，其值为 $\bar{\gamma}_1 = \varepsilon_s / N_0$ ；每个目的节点的每根接收天线上的平均信噪比也相同，其值为 $\bar{\gamma}_2 = \varepsilon_R / N_0$ ；S 至 R_m 、 R_m 至 D_n 的每对收发天线链路均为独立、同分布的瑞利衰落。

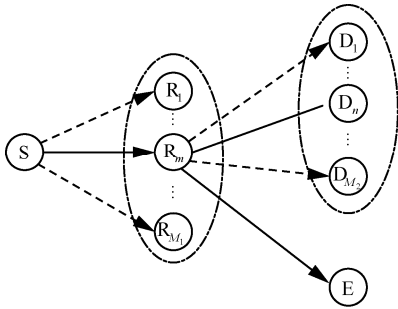


图 1 多中继选择和多用户选择 AF 系统的物理层安全模型

图 1 所示的 AF 中继系统工作在半双工模式，其信号传输在两个时隙内完成。在第一个时隙内，源节点 S 广播信号，中继节点 R_m 进行 MRC 合并，令 $\gamma_{i,m,j}$ 为源节点 S 第 i ($1 \leq i \leq N_1$) 根发射天线发送信号时中继节点 R_m 的第 j ($1 \leq j \leq N_2$) 根接收天线上的瞬时输出信噪比，则中继节点 R_m 经过 MRC 合并器后的瞬时输出信噪比为 $\gamma_{i,m} = \sum_{j=1}^{N_2} \gamma_{i,m,j}$ 。选择使 $\gamma_{i,m}$ 为最大（其值为 $\gamma_R = \max_{1 \leq i \leq N_1, 1 \leq m \leq M_1} \gamma_{i,m}$ ）的中继节点 R_{opt} （该中继节点称为最优中继节点^[17]）转发信号并选择与此对应的源节点 S 的第 i_{opt} 根天线发送信号。

在第二时隙内， R_{opt} 采用 AF 可变增益协议转

发第一时隙内接收到的信号，目的节点 D_n 进行 MRC 合并，令 $\gamma_{x,n,y}$ 为 R_{opt} 第 x ($1 \leq x \leq N_2$) 根发射天线转发信号时目的节点 D_n 的第 y ($1 \leq y \leq N_3$) 根接收天线上的瞬时输出信噪比，则目的节点 D_n 经过 MRC 合并器后的瞬时输出信噪比为 $\gamma_{x,n} = \sum_{y=1}^{N_3} \gamma_{x,n,y}$ 。选择使 $\gamma_{x,n}$ 为最大（其值为 $\gamma_D = \max_{1 \leq x \leq N_2, 1 \leq n \leq M_2} \gamma_{x,n}$ ）的目的节点 D_{opt} （该目的节点称为最优目的节点^[17]）接收信号，并选择与此对应的 R_{opt} 第 x_{opt} 根天线转发第一个时隙内接收到的信号。

为求源节点 S 到 R_{opt} 以及 R_{opt} 到 D_{opt} 的瞬时输出信噪比的 PDF (probability density function, 概率密度函数) 和 CDF (cumulative distribution function, 累积分布函数)，令瑞利衰落信道上采用 N 支路 MRC 合并器后的瞬时输出信噪比的 PDF 和 CDF 分别为^[18]：

$$f(N, \bar{\gamma}, \gamma) = \frac{\gamma^{N-1}}{(N-1)! \bar{\gamma}^N} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} \quad (1)$$

$$F(N, \bar{\gamma}, \gamma) = 1 - \sum_{p=0}^{N-1} \frac{\gamma^p}{p! \bar{\gamma}^p} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} \quad (2)$$

由参考文献[17]的式 (9) 可得，源节点 S 采用 TAS 发送信号、最优中继节点 R_{opt} 经过 MRC 合并器的瞬时输出信噪比 γ_R 的 PDF 为：

$$g(N_1, N_2, M_1, \bar{\gamma}_1, \gamma) = N_1 M_1 [F(N_2, \bar{\gamma}_1, \gamma)]^{N_1 M_1 - 1} f(N_2, \bar{\gamma}_1, \gamma) \quad (3)$$

令 $t_1 = N_2 + s_1$ ， $\bar{\Gamma}_1 = \bar{\gamma}_1 / (q_1 + 1)$ ， $\mathbf{b}_1 = (N_1, N_2, M_1, q_1, s_1, t_1)$ ，利用二项式展开定理和参考文献[18]的式 (6)，经化简整理后，可得：

$$g(\mathbf{b}_1, \bar{\gamma}_1, \gamma) = \sum_{q_1, s_1} J(\mathbf{b}_1) f(t_1, \bar{\Gamma}_1, \gamma) \quad (4)$$

其中：

$$\sum_{q_1, s_1} J(\mathbf{b}_1) = \sum_{q_1=0}^{N_1 M_1 - 1} \sum_{s_1=0}^{q_1} \binom{N_1 M_1 - 1}{q_1} C(s_1, q_1, N_2) \frac{(-1)^{q_1} N_1 M_1 (t_1 - 1)!}{(N_2 - 1)! s_1! (q_1 + 1)^{t_1}} \quad (5)$$



$$C(s_1, q_1, N_2) = \begin{cases} \frac{1}{s_1} \sum_{l=1}^{s_1} \binom{s_1}{l} [(q_1 + 1)l - s_1] C(s_1 - l, q_1, N_2), s_1 \leq N_2 - 1 \\ \frac{1}{s_1} \sum_{l=1}^{N_2-1} \binom{s_1}{l} [(q_1 + 1)l - s_1] C(s_1 - l, q_1, N_2), s_1 \geq N_2 - 1 \end{cases} \quad (6)$$

利用参考文献[19]可推得最优中继节点 R_{opt} 的 MRC 合并器的瞬时输出信噪比 γ_R 的 CDF 表达式为:

$$G(\mathbf{b}_1, \bar{\gamma}_1, \gamma) = 1 - \sum_{k_1=0}^{t_1-1} \sum_{q_1, s_1} J(\mathbf{b}_1) f(k_1 + 1, \bar{\gamma}_1, \gamma) \bar{\gamma}_1 \quad (7)$$

令 $t_2 = N_3 + s_2$, $\bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_2 / (q_2 + 1)$, $\mathbf{b}_2 = (N_2, N_3, M_2, q_2, s_2, t_2)$, 同理可得最优中继节点 R_{opt} 采用 TAS 技术、最优目的节点 D_{opt} 经过 MRC 合并器的瞬时输出信噪比 γ_D 的 PDF 和 CDF 分别为:

$$g(\mathbf{b}_2, \bar{\gamma}_2, \gamma) = \sum_{q_2, s_2} J(\mathbf{b}_2) f(t_2, \bar{\gamma}_2, \gamma) \quad (8)$$

$$G(\mathbf{b}_2, \bar{\gamma}_2, \gamma) = 1 - \sum_{k_2=0}^{t_2-1} \sum_{q_2, s_2} J(\mathbf{b}_2) f(k_2 + 1, \bar{\gamma}_2, \gamma) \bar{\gamma}_2 \quad (9)$$

由参考文献[20]的式(5)可得, 采用 AF 可变增益协议时, 源节点 S 到 D_{opt} 的等效输出信噪比为:

$$\gamma_{\text{SD}} = \frac{\gamma_R \gamma_D}{\gamma_R + \gamma_D + 1} \quad (10)$$

在 R_{opt} 向 D_{opt} 转发信号的过程中, 被动窃听者 E 窃听 R_{opt} 转发的信号, 并进行 MRC 合并, 其输出瞬时信噪比为 γ_E 。假设窃听节点的每根接收天线上的平均信噪比 $\bar{\gamma}_3$ 均相同, 最优中继节点 R_{opt} 发送信号, 对于 E 来说, 相当于是随机天线选择, 于是, 源节点 S 到窃听节点 E 的等效输出信噪比为:

$$\gamma_{\text{SE}} = \frac{\gamma_R \gamma_E}{\gamma_R + \gamma_E + 1} \quad (11)$$

其中, 被动窃听者 E 的 MRC 合并器的瞬时输出信噪比的 PDF 和 CDF 分别为 $f(N_4, \bar{\gamma}_3, \gamma)$ 和 $F(N_4, \bar{\gamma}_3, \gamma)$ 。

3 安全性能分析

3.1 非零安全容量 γ_E 量概率

合法信道与窃听信道的容量分别为 $C_D = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{\text{SD}})$ 和 $C_E = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{\text{SE}})$, 则非零安全容量概率为 $\Pr\{C_S > 0\}$, 其中 $C_S = \max\{C_D - C_E, 0\}$ 。采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的非零安全容量概率表达式为:

$$\Pr\{C_S > 0\} = \Pr\{\gamma_D > \gamma_E\} = \int_0^\infty F(N_4, \bar{\gamma}_3, \gamma) g(\mathbf{b}_2, \bar{\gamma}_2, \gamma) d\gamma \quad (12)$$

将式(8)和 $F(N_4, \bar{\gamma}_3, \gamma)$ 代入式(12), 经整理后可得:

$$\Pr\{C_S > 0\} = 1 - \sum_{p=0}^{N_4-1} \sum_{q_2, s_2} J(\mathbf{b}_2) \frac{1}{p!(t_2-1)! \bar{\gamma}_3^p \bar{\gamma}_2^{t_2}} \int_0^\infty \gamma^{p+t_2-1} \exp\left[-(1/\bar{\gamma}_3 + 1/\bar{\gamma}_2)\gamma\right] d\gamma \quad (13)$$

利用参考文献[19]可得:

$$\int_0^\infty \gamma^b \exp(-c\gamma) d\gamma = b!/c^{b+1} \quad (14)$$

将 $\bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_2 / (q_2 + 1)$ 代入式(13)可得:

$$\Pr\{C_S > 0\} = 1 - \sum_{p=0}^{N_4-1} \sum_{q_2, s_2} J(\mathbf{b}_2) \frac{(p+t_2-1)!(q_2+1)^{t_2}}{p!(t_2-1)! [1/\bar{\gamma}_3 + (q_2+1)/\bar{\gamma}_2]^{p+t_2}} \bar{\gamma}_3^p \bar{\gamma}_2^{t_2} \quad (15)$$

由式(15)可知, 采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的非零安全容量概率与中继节点发射天线数、目的节点接收天线数、窃听节点接收天线数以及目的节点数有关。

3.2 安全中断概率

由参考文献[4]可知, 安全中断概率定义为 AF

系统瞬时安全容量 C_s 小于预设目标安全速率 R_s 时发生安全中断的概率, 则采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的安全中断概率为:

$$P_{\text{out}}(R_s) = \Pr\{C_s < R_s\} = \Pr\left\{\frac{1 + \gamma_{\text{SD}}}{1 + \gamma_{\text{SE}}} < 2^{2R_s}\right\} \quad (16)$$

令 $a = 2^{2R_s}$, $\mu_1 = a(\mu + 1)$, $\mu_2 = (a - 1)(\mu + 1)$, 将式(10)和式(11)代入式(16), 可推得采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的安全中断概率为:

$$P_{\text{out}}(R_s) = \Pr\left\{\frac{(1 + \gamma_D)(\gamma_R + \gamma_E + 1)}{(1 + \gamma_E)(\gamma_R + \gamma_D + 1)} < a\right\} = \int_0^\infty I(\mu) f(N_4, \bar{\gamma}_3, \mu) d\mu \quad (17)$$

其中:

$$I(\mu) = 1 - \int_0^\infty \left[1 - G\left(\mathbf{b}_2, \bar{\gamma}_2, \mu_1 - 1 + \frac{\mu_1 \mu_2}{w}\right)\right] g(\mathbf{b}_1, \bar{\gamma}_1, w + \mu_2) dw \quad (18)$$

化简整理后可得:

$$I(\mu) = 1 - \sum_{q_1, s_1} J(\mathbf{b}_1) \sum_{q_2, s_2} J(\mathbf{b}_2) \sum_{k_2=0}^{t_2-1} \frac{S(\mu, \bar{\Gamma}_1, \bar{\Gamma}_2)}{k_2! \bar{\Gamma}_2^{k_2} (t_1 - 1)! \bar{\Gamma}_1^{t_1}} \quad (19)$$

其中:

$$S(\mu, \bar{\Gamma}_1, \bar{\Gamma}_2) = \int_0^\infty \left(\mu_1 - 1 + \frac{\mu_1 \mu_2}{w}\right)^{k_2} (w + \mu_2)^{t_1-1} \exp\left(-\frac{\mu_1 - 1}{\bar{\Gamma}_2} - \frac{\mu_1 \mu_2}{\bar{\Gamma}_2 w} - \frac{w + \mu_2}{\bar{\Gamma}_1}\right) dw \quad (20)$$

利用二项式展开定理和参考文献[19]可得:

$$\int_0^\infty \gamma^{\nu-1} \exp\left(-\frac{\lambda}{\gamma} - \gamma\right) d\gamma = 2\left(\frac{\lambda}{\gamma}\right)^{\nu/2} K_\nu(2\sqrt{\lambda\gamma}) \quad (21)$$

其中, $K_\nu(\cdot)$ 为第二类 ν 阶修正贝塞尔函数^[21], 可推得:

$$S(\mu, \bar{\Gamma}_1, \bar{\Gamma}_2) = 2 \sum_{r=0}^{k_2} \sum_{h=0}^{k_2-r} \sum_{f=0}^{t_1-1} \binom{k_2}{r} \binom{k_2-r}{h} \binom{t_1-1}{f} (-1)^{k_2-r-h} \exp\left(-\frac{\mu_1 - 1}{\bar{\Gamma}_2} - \frac{\mu_2}{\bar{\Gamma}_1}\right) \quad (22)$$

$$\mu_1^{(2h+f+r+1)/2} \mu_2^{(2t_1+r-f-1)/2} \bar{\Gamma}_1^{(f-r+1)/2} \bar{\Gamma}_2^{-(f-r+1)/2} K_{f-r+1}\left(2\sqrt{\mu_1 \mu_2 / (\bar{\Gamma}_1 \bar{\Gamma}_2)}\right)$$

将 $f(N_4, \bar{\gamma}_3, \mu)$ 、式(19)和 $\bar{\Gamma}_i = \bar{\gamma}_i / (q_i + 1)$ ($i = 1, 2$) 代入式(17)中, 化简整理后可推得采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的安全中断概率的精确半解析表达式为:

$$P_{\text{out}}(R_s) = 1 - \sum_{q_1, s_1} J(\mathbf{b}_1) \sum_{q_2, s_2} J(\mathbf{b}_2) \sum_{k_2=0}^{t_2-1} \frac{(q_1 + 1)^{t_1} (q_2 + 1)^{k_2}}{(t_1 - 1)! k_2! (N_4 - 1)! \bar{\gamma}_1^{t_1} \bar{\gamma}_2^{k_2} \bar{\gamma}_3^{N_4}} \int_0^\infty S(\mu, \bar{\Gamma}_1, \bar{\Gamma}_2) \mu^{N_4-1} e^{-\mu/\bar{\gamma}_3} d\mu \quad (23)$$

由式(23)可知, 采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的安全中断概率与源节点发射天线数、中继节点天线数、目的节点接收天线数、窃听节点接收天线数、中继节点数以及目的节点数有关; 当源节点、中继节点、目的节点、窃听节点均为单天线场景且目的节点数为 1 时, 式(23)与参考文献[5]的式(13)在理想 CSI、单窃听场景下的安全中断概率表达式相同; 当源节点、目的节点、窃听节点均为单天线场景且中继节点数与目的节点数均为 1 时, 式(23)与参考文献[12]的式(12)的结果相同, 可见, 本文的结果更具一般性。

3.3 渐近安全中断概率

为了更直观地反映源节点发射天线数、中继节点天线数、目的节点接收天线数、窃听节点接收天线数以及中继节点与目的节点数对采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的安全性能的影响, 下面推导了其在高信噪比下的安全中断概率渐近表达式。



当 $\bar{\gamma}_i \rightarrow \infty$, $i=1,2$ 时, 将 $f(N_{i+1}, \bar{\gamma}_i, \gamma_i)$ 中的 $\exp(-\gamma_i/\bar{\gamma}_i)$ 项进行麦克劳林级数展开, 可推得式(7)和式(9)的渐近表达式为:

$$G_i^\infty(\gamma_i) \approx \frac{1}{(N_{i+1}!)^{N_i M_i}} (\gamma_i / \bar{\gamma}_i)^{N_i N_{i+1} M_i}, i=1,2 \quad (24)$$

利用参考文献[17]中的式(16)可得:

$$G(\gamma_{th}) = 1 - \int_0^\infty [1 - G_2(\gamma_{th} + x^2/w)] g_1(w + \gamma_{th}) dw \leq 1 - [1 - G_1(\gamma_{th})][1 - G_2(\gamma_{th})] \approx G_1(\gamma_{th}) + G_2(\gamma_{th}) \quad (25)$$

可推得式(18)的渐近表达式为:

$$I(\mu) \approx G_1^\infty(\mu_2) + G_2^\infty(\mu_1 - 1) \quad (26)$$

将 $F(N_4, \bar{\gamma}_3, \mu)$ 和式(26)代入式(17)中, 经化简整理后, 可推得采用 TAS/MRC 天线分集的多中继选择与多用户选择 MIMO AF 系统的安全中断概率渐近表达式为:

$$P_{out}^\infty = (\Phi \bar{\gamma}_2)^{-\Delta} + o(\bar{\gamma}_2^{-\Delta}) \quad (27)$$

其中, Δ 表示系统的安全分集增益, 令 $\Delta_1 = N_1 N_2 M_1$, $\Delta_2 = N_2 N_3 M_2$, 则 $\Delta = \min[\Delta_1, \Delta_2]$. Φ 表示采用 TAS/MRC 天线分集的多中继选择与多用户选择 MIMO AF 系统的安全阵列增益, 其计算式如下:

$$\Phi = \begin{cases} \Phi_1^{-1/\Delta_1}, & \Delta_1 < \Delta_2 \\ \Phi_2^{-1/\Delta_2}, & \Delta_1 > \Delta_2 \\ (\Phi_1 + \Phi_2)^{-1/\Delta_2}, & \Delta_1 = \Delta_2 \end{cases} \quad (28)$$

其中:

$$\Phi_1 = \sum_{\alpha=0}^{\Delta_1} \binom{\Delta_1}{\alpha} \frac{(a-1)^{\Delta_1} \bar{\gamma}_3^\alpha (\alpha + N_4 - 1)!}{(N_4 - 1)! (N_2!)^{N_1 M_1}} \quad (29)$$

$$\Phi_2 = \sum_{\beta=0}^{\Delta_2} \binom{\Delta_2}{\beta} \frac{a^\beta (a-1)^{\Delta_2 - \beta} \bar{\gamma}_3^\beta (\beta + N_4 - 1)!}{(N_4 - 1)! (N_3!)^{N_2 M_2}} \quad (30)$$

由式(27)可知: 采用 TAS/MRC 天线分集的多中继选择与多用户选择 MIMO AF 系统的安全分集增益 Δ 为源节点发射天线数、最优中继节点接收天线数、中继节点数三者乘积与最优中继

节点发射天线数、最优用户接收天线数、用户数三者乘积之间的最小值; 增大上述系统的安全分集增益, 能够显著提升系统的物理层安全性能。

4 数值计算与仿真

下面利用 MATLAB 软件对瑞利衰落信道上采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的物理层安全性能指标进行数值计算和蒙特卡洛仿真, 研究不同的 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 M_1 和 M_2 对系统安全性能的影响, 其结果如图 2~图 4 所示。仿真的系统参数设置见表 1, 其中 $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2$ 。

图 2 给出了不同 (N_2, N_3, M_2) 情况下采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择 MIMO AF 系统的非零安全容量概率性能曲线。由

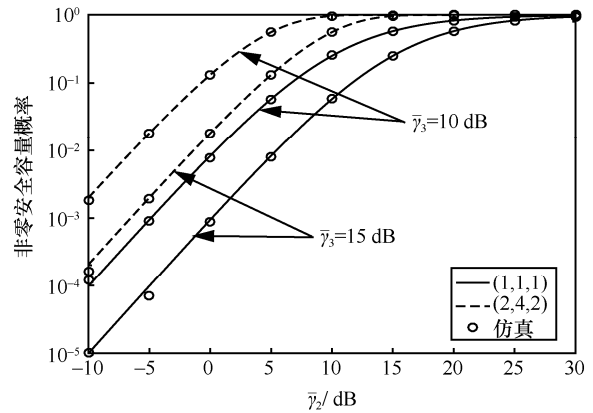


图 2 不同 (N_2, N_3, M_2) 下 AF 系统的非零安全容量概率

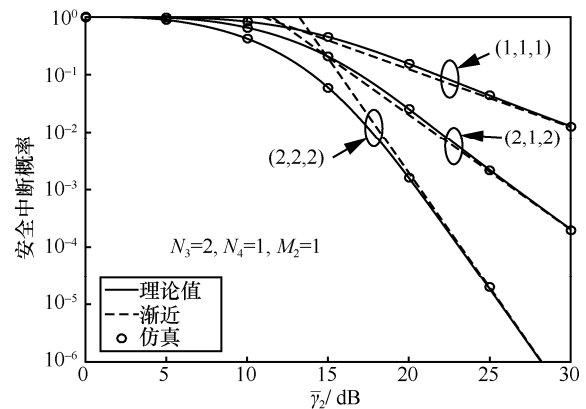


图 3 不同 (N_1, N_2, M_1) 下 AF 系统的安全中断概率

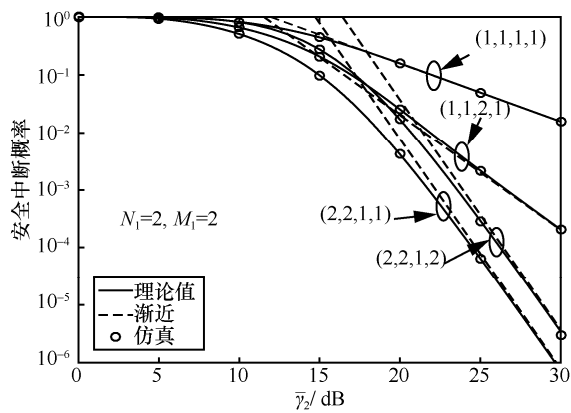
图4 不同 (N_2, M_2, N_3, N_4) 下AF系统的安全中断概率

表1 多中继与多用户选择MIMO AF系统仿真参数设置

	图2	图3	图4
S发射天线数 N_1	2	{1,2}	2
R_m 收发天线数 N_2	{1,2}	{1,2}	{1,2}
D_n 接收天线数 N_3	{1,4}	2	{1,2}
E接收天线数 N_4	2	1	{1,2}
中继节点数 M_1	2	{1,2}	2
目的节点(用户)数 M_2	{1,2}	1	{1,2}
目标安全速率 $R_s / (\text{bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1})$	1	1	1
窃听信道平均信噪比 $\bar{\gamma}_3 / \text{dB}$	{10,15}	5	5

图2可知,利用式(15)得到的 $(N_2, N_3, M_2) = (1,1,1), (2,4,2)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统的非零安全容量概率表达式的精确数值计算结果与蒙特卡洛计算机仿真结果相吻合,从而验证了理论分析的正确性; N_2 、 N_3 以及 M_2 越大,非零安全容量概率越大,其物理层安全性能越好。当 $\bar{\gamma}_3 = 10 \text{ dB}$ 、 $\Pr(C_s > 0) = 10^{-2}$ 时, $(N_2, N_3, M_2) = (2,4,2)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统所需的信噪比比 $(1,1,1)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统小约7.0 dB;当 $\bar{\gamma}_3 = 15 \text{ dB}$ 、 $\Pr(C_s > 0) = 10^{-3}$ 时, $(2,4,2)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统所需的信噪比比 $(1,1,1)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统小约6.7 dB。

图3给出了不同 (N_1, N_2, M_1) 情况下采用TAS/MRC天线分集的多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全中断概率性能曲线。由图3可知,利用式(23)得到的 $(N_1, N_2, M_1) = (1,1,1), (2,1,2), (2,2,2)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全中断概率表达式的精确数值计算结果与其相对应的仿真值相吻合,从而验证了理论分析的正确性;利用式(27)得到的安全中断概率的渐近结果与高信噪比下的仿真结果、理论分析结果接近,从而验证了渐近分析的准确性; $(1,1,1), (2,1,2), (2,2,2)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统对应的安全分集增益分别为1、2、4,由此可知,安全分集增益越大,采用TAS/MRC天线分集的多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全中断概率越小,其物理层安全性能越好。

图4给出了不同 (N_2, M_2, N_3, N_4) 情况下采用TAS/MRC天线分集的多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全中断概率性能曲线。由图4可知,与 $(N_2, M_2, N_3, N_4) = (1,1,1,1)$ 情况下单天线、单用户AF系统相比, TAS/MRC天线分集的 $(N_2, M_2, N_3, N_4) = (2,2,1,1)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全中断概率明显减小,即其物理层安全性能得到了显著提升;增加窃听者天线数 N_4 ,会恶化多中继与多用户选择MIMO AF系统的物理层安全性能,如当 $P_{\text{out}}(R_s) = 10^{-5}$ 时, $(2,2,1,2)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统所需的信噪比比 $(2,2,1,1)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统增大了约1.7 dB; $(2,2,1,1)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全中断概率渐近性能曲线和 $(2,2,1,2)$ 情况下多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全中断概率渐近性能曲线平行,这是因为它们的安全分集增益相同,均为4;采用TAS/MRC天线分集的多中继与多用户选择MIMO AF系统的安全分集增益与窃听



信道无关。

5 结束语

本文研究了瑞利衰落信道上采用 TAS/MRC 天线分集的多中继与多用户选择的 MIMO AF 系统的物理层安全性能,得到了 MIMO AF 系统的非零安全容量概率和安全中断概率的精确表达式,并进一步对其安全中断概率进行了渐近性能的分析。数值计算和仿真结果验证了其非零安全容量概率和安全中断概率理论推导的正确性以及渐近安全中断概率理论推导的准确性。分析各节点收发天线数、中继数和用户数对系统安全性能的影响,可得如下结果:系统的安全分集增益主要取决于主信道上各节点收发天线数、中继数和用户数,与窃听信道无关;增加源节点发射天线数、中继节点收发天线数、目的节点接收天线数、中继数和用户数均能有效提高系统的安全性能;增加窃听节点接收天线数会恶化系统的安全性能。

参考文献:

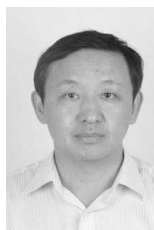
- [1] JINDAL A, KUNDU C, BOSE R. Secrecy outage of dual-hop AF relay system with relay selection without eavesdropper's CSI[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(10): 1759-1762.
- [2] 冯友宏, 杨志, 丁绪星, 等. 无线协作网络中的最优中继选择方案及中断概率分析[J]. 电信科学, 2018, 34(11): 93-101.
FENG Y H, YANG Z, DING X X, et al. Optimal relay selection scheme and outage probability analysis in cooperative wireless networks[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(11): 93-101.
- [3] ZHOU Q, ZANG G, GAO Y, et al. Opportunistic relay selection for secure communication in AF multi-antenna relaying networks[C]/IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, March 25-26, 2017, Chongqing, China. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2573-2577.
- [4] NGUYEN B V, KIM K. Secrecy outage probability of optimal relay selection for secure AnF cooperative networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2086-2089.
- [5] HWANG K S, HWANG K S. Performance analysis of secrecy outage probability for AF-based partial relay selection with outdated channel estimates[J]. Mobile Information Systems, 2017: 1-8.
- [6] DENG D, FAN L, ZHAO R, et al. Secure communications in multiple amplify-and-forward relay networks with outdated channel state information[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2016, 27(4): 494-503.
- [7] MABROUK A, TOURKI K, HASNA M O, et al. Performance analysis of secure AF relay networks using cooperative jamming under outdated CSI[J]. IET Communications, 2017, 11(14): 2199-2205.
- [8] MABROUK A, TOURKI K, HAMDI N. Transmission mode selection scheme for physical layer security in multi-user multi-relay systems[C]/IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, Sept 4-8, 2016, Valencia, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [9] FAN L, LEI X, DUONG T Q, et al. Secure multiuser communications in multiple amplify-and-forward relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(9): 3299-3310.
- [10] 阳析, 金石. 大规模 MIMO 系统传输关键技术研究进展[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 28-35.
YANG X, JIN S. Overview of key technologies of transmission in massive MIMO system[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 28-35.
- [11] 张亚军, 梁涛, 柳永祥, 等. 联合发端天线选择和收端人工噪声的物理层安全传输方法[J]. 电子与信息学报, 2015(9): 2183-2190.
ZHANG Y J, LIANG T, LIU Y X, et al. Hybrid transmit antenna selection and full-duplex artificial-noise-added receiver scheme for physical layer security enhancement[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015(9): 2183-2190.
- [12] HWANG K S. Secrecy outage probability of AF relay transmission with MRC/TAS in presence of eavesdropper[J]. Journal of Korea Multimedia Society, 2016, 19(3): 620-625.
- [13] FAN L, ZHAO R, GONG F K, et al. Secure multiple amplify-and-forward relaying over correlated fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(7): 2811-2820.
- [14] 李光球, 董家云. Nakagami 衰落上 DE-QPSK 在联合收发分集下的性能分析[J]. 电信科学, 2015, 31(8): 72-77.
LI G Q, DONG J Y. Performance analysis of DE-QPSK with joint transmit and receive diversity in Nakagami fading[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(8): 72-77.
- [15] HU J, CAI Y, YANG N, et al. A new secure transmission scheme with outdated antenna selection[J]. IEEE Transactions

- on Information Forensics and Security, 2017, 10(11): 2435-2446.
- [16] HUANG Y, AI-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.
- [17] LEE D. SER of TAS-MRC with relay and user selection in MIMO-relay systems over non-identical Nakagami fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(7): 1645-1648.
- [18] 李光球. Nakagami 衰落信道上组合 SC/MRC 的性能分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 187-191.
- LI G Q. Performance analysis of combined transmit SC/receive MRC in Nakagami fading channels[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(2): 187-191.
- [19] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series and products[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2007.
- [20] HASNA M O, ALOUINI M S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1126-1131.
- [21] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. New York: Dover Publications, 1972.

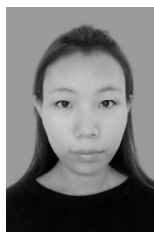
[作者简介]



任婷洁(1994-), 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。



程英(1995-), 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。