

文章编号: 1673-5196(2021)06-0094-06

基于 SWIPT NOMA 的星地系统性能分析

赵进龙^{*1,2}, 霍明明³, 谭等泰¹

(1. 甘肃政法大学 人工智能学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 3. 兰州理工大学 档案馆, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了提高星地系统的资源利用率和用户公平性, 提出一种无线携能(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术辅助星地系统的传输方案. 首先, 在非理想信道状态信息(channel state information, CSI) 条件下研究了系统的中断性能, 并推导了中断概率表达式. 其次, 通过分析渐近中断概率, 发现由于存在非理想 CSI 导致中断概率在高信噪比区域出现了错误平台. 此外, 还研究了不同程度的信道估计误差和阴影衰落对系统吞吐量和能量效率的影响. 最后, 通过数值仿真结果验证了理论推导的正确性和 SWIPT NOMA 技术引入星地系统所获得的性能增益.

关键词: 星地系统; NOMA; SWIPT; 系统性能; 非理想 CSI

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Performance analysis of SWIPT NOMA based satellite-terrestrial system

ZHAO Jin-long^{1,2}, HUO Ming-ming³, TAN Deng-tai¹

(1. School of Artificial Intelligence, Gansu University of Political Science and Law, Lanzhou 730070, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Archives Center, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to improve the resource utilization and user fairness of satellite-terrestrial system, a simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) non-orthogonal multiple access (NOMA) technology assisted satellite-terrestrial system transmission scheme is proposed. Firstly, the outage performance of the system is investigated in the presence of imperfect channel state information (CSI), and the outage probability expression is derived. Secondly, by analyzing the asymptotic outage probability, it is observed that there is an error floor in the high SNR region due to the existence of imperfect CSI. In addition, the effects of channel estimation errors and shadow fading on system throughput and energy efficiency are studied. Finally, the numerical simulation results are provided to validate theoretical derivation and the performance gains obtained by introducing SWIPT NOMA technology into the satellite-terrestrial system.

Key words: satellite-terrestrial system; NOMA; SWIPT; system performance; imperfect CSI

随着无线通信技术和卫星通信业务的需求, 星地融合系统被广泛认为是未来无线接入网向用户提供全球服务的重要组成部分之一. 星地融合系统整合了地面网络和卫星网络两大信息基础设施, 有能力为用户提供全球服务以及提高卫星和地面网络的资源利用率. 目前, 地面网络产生的海量数据连接和无线业务量给卫星通信系统的多址接入带

来了巨大挑战, 并且传统的多址技术难以满足星地融合系统所提出的性能指标要求. 非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术是一种能够满足大规模连接和解决低时延需求的有效方案^[1-2]. 因此, 将 NOMA 技术引入到星地融合系统, 可以提高频谱效率和用户公平性^[3-4].

在基于 NOMA 的星地协作系统研究中, Yan 等^[5]结合 NOMA 策略的优势, 分析了地面移动卫星网络的系统性能, 通过分析遍历速率、能量效率、中断概率以及误码率等性能指标, 验证了信道衰落

收稿日期: 2020-12-23

通讯作者: 赵进龙(1985-), 男, 河北井陉人, 硕士, 讲师.

Email: zhaojinlong0010@163.com

参数和用户选择策略对系统性能的影响.Xie 等^[6]研究了放大转发中继模式下的星地 NOMA 网络的性能,并且考虑了信道估计误差对系统的影响,同时为了保证用户公平性,提出了一种低复杂度的功率分配算法,数值结果验证了 NOMA 方案的优越性.随后,又提出了一个运用译码转发中继策略的综合星地 NOMA 系统,采用基于导频的信道估计方法,研究了非理想信道状态信息(channel state information, CSI)对网络性能的影响^[7].为了进一步提高频谱效率,Qi 等^[8]构建了单波束覆盖条件下地面用户与空中无人机用户组成的 NOMA 模型,通过功率分配算法进行有效计算,保证了系统内接入用户的公平性.Li 等^[9]使用中继卫星协助地面用户与地面基站通信,解决地面中继在自然灾害、导航等特殊场景下应用困难的问题.此外,为了研究非理想串行干扰消除(successive interference cancellation, SIC)对星地系统的影响,Yue 等^[10]研究了排序用户的中断概率以及不同程度的残留干扰对中断性能的影响.

无线携能通信(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)是一种能够有效延长能量受限网络使用年限的解决方案,可以实现对恶劣工作环境中的设备进行供电,例如太空、沙漠、矿井、灾区救援、应急保障等一些复杂环境.Singh 等^[11]提出了一种基于功率拆分协议的认知星地中继网络,卫星利用直连链路和中继链路与地面用户进行通信,并推导出了延时受限模式下卫星的系统吞吐量和能量效率,分析了功率拆分因子和频谱共享系数对系统性能的影响;随后又分析了采用时间切换协议的星地网络性能^[12].另外,Chen 等^[13]研究了一种高海拔中继辅助下行卫星通信的系统,在满足从卫星到地面站下行速率要求的同时,尽量减少同轨道下行链路的能量消耗,并通过一种在线调度算法最小化链路的耗能,从而提高了系统的吞吐量和能量效率.

基于 NOMA 的星地系统可以提供海量的数据连接和广泛的覆盖范围,而 SWIPT 技术能够延长能量受限网络的使用寿命,因此,联合 NOMA 方案与 SWIPT 技术应用于星地系统具有一定的研究价值.此外,在实际通信场景中,由于用户处于不断移动的状态,路径损耗具有不确定性,特别是对于 5G 大规模用户的接入,获取理想的 CSI 是一个很大的技术挑战.

本文主要研究了基于 SWIPT NOMA 的星地系统性能,通过分析中断概率、吞吐量以及能量效率等性能指标,验证了信道衰落参数以及非理想 CSI

对系统性能的影响.

1 系统模型

1.1 信号模型

考虑一个 SWIPT NOMA 辅助的星地系统,如图 1 所示.卫星 S 通过地面中继 R 与 K 个地面用户进行通信,其中, R 使用功率拆分协议从源节点发出的射频信号中收集能量.在该场景中, S、R 和所有用户均配备单天线,并且由于卫星与地面用户之间存在严重的阴影衰落或者物理障碍,所以它们之间不存在直连链路. S 到 R、R 到第 k 个用户的信道系数分别使用 h_R 和 h_k 来表示.此外,考虑到实际应用场景中很难获取理想的 CSI,所以将实际的信道系数 \bar{h}_k 建模为 $\bar{h}_k = h_k + e_k$,其中, h_k 表示估计信道系数, e_k 表示信道估计误差,并且服从 $e_k \sim \text{CN}(0, \sigma_k^2)$.为了使用户在执行 SIC 时能够获取更好的性能,将 R 到 K 个地面用户的信道增益根据排序理论进行排序,即: $|h_1|^2 \leq |h_2|^2 \leq \dots \leq |h_K|^2$.

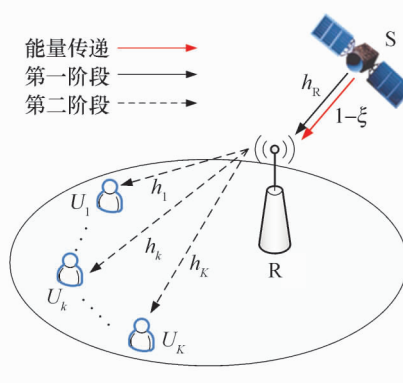


图 1 系统模型

Fig.1 System model

功率拆分协议如图 2 所示.

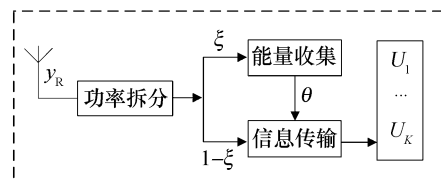


图 2 功率拆分协议

Fig.2 Power splitting protocol

假定整个通信过程在两个时隙内完成.在第一个时隙, S 发送叠加信号 $\sum_{i=1}^K \sqrt{a_i P_s} x_i$ 到中继 R, 其中, P_s 表示 S 的发射功率, x_i 表示第 i 个用户的接收信号, a_i 表示第 i 个用户的功率分配因子, 并且满足

条件 $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_K$ 和 $\sum_{i=1}^K \sqrt{a_i} = 1$. 因此, 在 R 节点处接收到的信号表示为

$$y_R = \sqrt{1-\xi}(h_R + e_R) \sum_{i=1}^K \sqrt{a_i} P_S x_i + n_R \quad (1)$$

其中: ξ 表示功率拆分系数; $n_R \sim \text{CN}(0, \sigma_R^2)$ 表示在 R 处的高斯白噪声.

由于 R 采用功率拆分协议进行能量收集, 所以假设整个传输块的长度为 T , 那么在 $T/2$ 时间内收集到的能量可以表示为

$$E_R = \frac{T\theta\xi P_S |h_R|^2}{2} \quad (2)$$

其中: θ 表示能量转换效率系数, 并且满足 $0 \leq \theta \leq 1$. 通过式(2), 可以得到 R 的发射功率为

$$P_R = \frac{E_R}{T} = \theta\xi P_S |h_R|^2 \quad (3)$$

在第二个时隙, R 采取放大转发策略, 将接收到的叠加信号经过放大处理后转发给 K 个用户. 此时, 第 k 个用户接收到的信号表示为

$$y_k = \Delta(h_k + e_k)y_R + n_k \quad (4)$$

其中: $\Delta = \sqrt{P_R / (P_S E(|h_R|^2) + P_S \sigma_{e_R}^2 + \sigma_R^2)}$ 表示放大转发中继的固定放大增益因子; $n_k \sim \text{CN}(0, \sigma_k^2)$ 表示在用户 k 处的高斯白噪声.

在执行 SIC 解码时, 根据用户信道增益的排序结果设置解码顺序为 $\{1, 2, \dots, K\}$. 为了便于计算, 假设 $\rho = P_S / \sigma_R^2 = P_S / \sigma_k^2$, 并且设定 $m < k$, 在用户 k 处解码用户 m 的信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)表示为

$$\gamma_{k \rightarrow m} = a_m \rho |h_R|^2 |h_k|^2 / (\hat{a}_m \rho |h_R|^2 |h_k|^2 + \psi_{1,k} |h_R|^2 + \psi_{2,k} |h_k|^2 + \psi_{3,k}) \quad (5)$$

其中: $\hat{a}_m = \sum_{i=m+1}^K \sqrt{a_i}$; $u_1 = 1/\Delta^2(1-\xi)$; $u_2 = 1/(1-\xi)$; $\psi_{1,k} = \rho\sigma_{e_k}^2$; $\psi_{2,k} = \rho\sigma_{e_R}^2 + u_2$; $\psi_{3,k} = \rho\sigma_{e_R}^2\sigma_{e_k}^2 + u_2\sigma_{e_k}^2 + u_1$. SIC 解码会一直被执行, 直到 k 个用户的信号全部被解码. 此时, 用户 k 解码自己信号的 SINR 表示为

$$\gamma_{k \rightarrow k} = a_k \rho |h_R|^2 |h_k|^2 / (\hat{a}_k \rho |h_R|^2 |h_k|^2 + \psi_{1,k} |h_R|^2 + \psi_{2,k} |h_k|^2 + \psi_{3,k}) \quad (6)$$

对于第 K 个用户来说, 首先要将之前的 $K-1$ 个用户的信号解码完成, 然后开始解码自己的信号, 对应的 SINR 可以表示为

$$\gamma_K = \frac{a_K \rho |h_R|^2 |h_K|^2}{\psi_{1,K} |h_R|^2 + \psi_{2,K} |h_K|^2 + \psi_{3,K}} \quad (7)$$

1.2 信道模型

假设 S 到 R 的链路服从阴影莱斯分布, 则 $|h_R|^2$ 的概率密度函数(probability density function, PDF)表示为

$$f_{|h_R|^2}(x) = \alpha_r \sum_{j=0}^{m_r-1} \frac{(-1)^j (1-m_r)_j \delta_r^j}{(j!)^2} x^j e^{-(\beta_r - \delta_r)x} \quad (8)$$

其中: $\alpha_r = (2b_r m_r)^{m_r} / 2b_r (2b_r m_r + \Omega_r)^{m_r}$; $\beta_r = 1/2b_r$; $\delta_r = \Omega_r / 2b_r (2b_r m_r + \Omega_r)$; $2b_r$ 和 Ω_r 分别表示多径分量和可视径分量的平均功率; m_r 是 Nakagami- m 分布的衰落参数; $(\cdot)_j$ 是阶乘幂.

$|h_R|^2$ 的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)表示为

$$F_{|h_R|^2}(x) = 1 - \alpha_r \sum_{j=0}^{m_r-1} \frac{(-1)^j (1-m_r)_j \delta_r^j}{j!} \times \sum_{l=0}^j \frac{(\beta_r - \delta_r)^{-(j+1-l)}}{l!} x^l e^{-(\beta_r - \delta_r)x} \quad (9)$$

考虑地面链路服从 Nakagami- m 分布, 则 $|h_k|^2$ 的 PDF 和 CDF 分别表示为

$$f_{|h_k|^2}(x) = \frac{m_k^{m_k} x^{m_k-1}}{\omega_k^{m_k} \Gamma(m_k)} e^{-\frac{m_k x}{\omega_k}}, \quad x \geq 0 \quad (10)$$

$$F_{|h_k|^2}(x) = 1 - e^{-\frac{m_k x}{\omega_k}} \sum_{j=0}^{m_k-1} \frac{1}{j!} \left(\frac{m_k x}{\omega_k}\right)^j, \quad x \geq 0 \quad (11)$$

其中: $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数; ω_k 为地面链路的平均功率; m_k 为表示衰落程度的参数.

根据排序统计理论^[14], 经过排序后的信道增益 $|h_{k^*}|^2$ 的 CDF 表示为

$$F_{|h_{k^*}|^2}(x) = \Xi_k \sum_{t=0}^{K-k} \binom{K-k}{t} \frac{(-1)^t}{k+t} (F_{|h_k|^2}(x))^{k+t} \quad (12)$$

其中:

$$\Xi_k = \frac{K!}{(k-1)!(K-k)!}$$

2 性能分析

2.1 中断概率

为了保证用户的服务质量, 地面用户的数据速率必须高于预定的目标数据速率. 当 CSI 条件确定的传输速率低于目标速率时, 则发生中断事件. 假定 $\gamma_{\text{th}k}$ 和 R_k 分别代表用户 k 预设的 SINR 阈值和目标数据速率, 并且满足 $R_k = \log(1 + \gamma_{\text{th}k})$.

用户 k 的中断事件定义为:当用户 k 不能解码自己的信号或者用户 m ($1 \leq m < k$) 的信号时,则发生中断.所以用户 k 发生中断的补事件可以描述为

$$Z_{k,m} = \{\gamma_{k \rightarrow m} > \gamma_{\text{thm}}\} = \left\{ |h_k|^2 > \chi_m, |h_R|^2 > \frac{\chi_m(\psi_{3,k} + \psi_{2,k} |h_k|^2)}{\psi_{1,k}(|h_k|^2 - \chi_m)} \right\} \quad (13)$$

$$\text{其中: } \chi_m = \frac{\gamma_{\text{thm}} \psi_{1,k}}{(a_m - \gamma_{\text{thm}} \hat{a}_m) \rho}; a_m > \gamma_{\text{thm}} \hat{a}_m.$$

根据上述解释,用户 k 的中断概率可表示为

$$P_{\text{out}}^k = 1 - P_r(Z_{k,1} \cap Z_{k,2} \cap \dots \cap Z_{k,k}) = \left\{ |h_k|^2 > \epsilon_k, |h_R|^2 > \frac{\epsilon_k(\psi_{3,k} + \psi_{2,k} |h_k|^2)}{\psi_{1,k}(|h_k|^2 - \epsilon_k)} \right\} \quad (14)$$

$$\text{其中: } \epsilon_k = \max_{1 \leq m \leq k} \chi_m.$$

为了便于分析和计算,将式(14)改写为

$$P_{\text{out}}^k = 1 - P_r \left[\frac{|h_R|^2 |h_k|^2 \frac{\psi_{1,k} \psi_{2,k}}{\psi_{3,k}^2} > \frac{\epsilon_k \psi_{2,k}}{\psi_{3,k}}}{\frac{\psi_{1,k}}{\psi_{3,k}} |h_R|^2 + \frac{\psi_{2,k}}{\psi_{3,k}} |h_k|^2 + 1} \right] \quad (15)$$

根据不等式 $\frac{XY}{X+Y+1} \leq \min(X, Y)$ 和式(15),用户 k 的中断概率下界表示为

$$P_{\text{out}}^{k,\text{LB}} = 1 - P_r(\min(\psi_{1,k} |h_R|^2, \psi_{2,k} |h_k|^2) > \epsilon_k \psi_{2,k}) = F_{|h_R|^2} \left(\frac{\epsilon_k \psi_{2,k}}{\psi_{1,k}} \right) + F_{|h_k|^2}(\epsilon_k) - F_{|h_R|^2} \left(\frac{\epsilon_k \psi_{2,k}}{\psi_{1,k}} \right) F_{|h_k|^2}(\epsilon_k) \quad (16)$$

将式(9,12)代入式(16),就可以得到用户 k 的中断概率下界.

2.2 渐近中断概率

为了能够更深入地了解系统的中断性能,分析了在高信噪比(signal to noise ratio, SNR)条件下的渐进中断概率.定义:

$$\lambda_k = \max_{1 \leq m \leq k} [\gamma_{\text{thm}} / (a_m - \gamma_{\text{thm}} \hat{a}_m)]$$

在高信噪比条件下则有:

$$\epsilon_k = \frac{\lambda_k \psi_{1,k}}{\rho} \approx \lambda_k \sigma_{eR}^2 \quad (17)$$

$$\vartheta_k = \frac{\lambda_k \psi_{1,k}}{\rho} \left(\frac{\rho \sigma_{eR}^2 + u_2}{\rho \sigma_{eR}^2} \right) \approx \lambda_k \sigma_{eR}^2 \quad (18)$$

将式(17)和式(18)分别代入式(9)和式(12),可以得到:

$$F_{|h_R|^2}(\vartheta_k) \approx 1 - \alpha_r \sum_{j=0}^{m_r-1} \frac{(-1)^j (1 - m_r)_j \delta_r^j}{j!} \times \sum_{l=0}^j \frac{(\beta_r - \delta_r)^{-(j+1-l)}}{l!} (\lambda_k \sigma_{eR}^2)^l e^{-(\beta_r - \delta_r) \lambda_k \sigma_{eR}^2} \quad (19)$$

$$F_{|h_k|^2}(\epsilon_k) \approx \Xi_k \sum_{t=0}^{K-k} \left[\begin{matrix} K-k \\ t \end{matrix} \right] \frac{(-1)^t}{k+t} \left(1 - e^{-\frac{m_k \lambda_k \sigma_{eR}^2}{\omega_k}} \sum_{j=0}^{m_k-1} \frac{1}{j!} \left(\frac{m_k \lambda_k \sigma_{eR}^2}{\omega_k} \right)^j \right)^{k+t} \quad (20)$$

通过上述的计算,可以发现在高信噪比条件下, $F_{|h_R|^2}(\vartheta_k)$ 和 $F_{|h_k|^2}(\epsilon_k)$ 均趋于一个常数,所以中断概率会保持为一个非零的常数(错误平台).

此外,根据得出的渐近中断概率可以推导出系统的分集阶数为

$$d = -\lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{\log(P_{\text{out}}^{k,\infty})}{\log \rho} = 0 \quad (21)$$

2.3 系统吞吐量

系统吞吐量是衡量无线通信系统性能的一项重要指标.根据上述中断概率的计算结果,在本节中分析了延时受限传输模式下的吞吐量.在该传输模式下,卫星以恒定的速率向地面用户发送数据信息,此时系统吞吐量的性能主要会受到用户中断概率的影响.因此,系统吞吐量的表达式可以定义为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^K R_i (1 - P_{\text{out}}^{i,\text{LB}}) \quad (22)$$

其中: $P_{\text{out}}^{i,\text{LB}}$ 可以从式(16)中获得.

2.4 能量效率

无线网络中对于能量效率的研究已成为绿色通信的重要研究课题.能量效率是指每能量单位传输的信息比特数目,被认为是新一代通信系统的有效性能指标.因此,本节研究了延时受限传输模式下的能量效率.基于式(22)中的吞吐量分析,能量效率的表达式可以表示为

$$\eta = \frac{R_{\text{sum}}}{\kappa P_S + P_L} \quad (23)$$

其中: κ 是功率放大效率, $\kappa > 1$; P_L 是包含电路功率以及其他设备的固定功率消耗.

3 数值分析

本节通过数值分析来阐明重要参数对所考虑系统性能的影响.在仿真中,阴影莱斯信道参数设置为重度衰落(heavy shadowing, HS)和中度衰落(average shadowing, AS)两种模式,相应的参数配置为:

$$\text{HS: } (b_r, m_r, \Omega_r) = (0.063, 2, 0.0005)$$

$$\text{AS: } (b_r, m_r, \Omega_r) = (0.251, 5, 0.279)$$

此外,假设 $K = 3$,功率分配系数分别为 $a_1 =$

$0.5, a_2 = 0.4, a_3 = 0.1^{[10]}$; 用户的目标速率分别设置为 $R_1 = 0.1$ bit/s/Hz, $R_2 = 0.5$ bit/s/Hz, $R_3 = 1$ bit/s/Hz; $\theta = 0.7, \xi = 0.4, 1/\Delta^2 = 0.9^{[16]}$, $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1$.

图 3 分析了不同的阴影衰落模式下, 3 个用户的中断性能随传输 SNR 变化的情况. 在仿真中, 假设 $\sigma = \sigma_{e1}^2 = \sigma_{e2}^2 = \sigma_{e3}^2 = \sigma_{eR}^2$, 从图中可以观察到用户的中断性能与卫星信道的衰落程度密切相关. 通过比较 HS 和 AS 两种衰落模式下的中断概率, 可以发现 AS 模式下的中断性能要优于 HS 模式, 这是因为随着与衰落程度相关的参数 (b_r, m_r, Ω_r) 的增大, 对应的接收信号中的可视径分量以及多径分量的平均功率也随着变大, 则降低了用户发生中断的概率. 此外, 随着信道估计误差平均功率的增大, 3 个用户的中断性能明显下降; 特别是在高 SNR 区域, 用户的中断性能不再随着传输 SNR 的增加而发生变化, 出现了错误平台, 这也验证了式(21)的分析结果. 最后, 从图中还可以观察到在中、高 SNR 区域, 蒙特卡洛仿真结果与理论分析结果曲线几乎重合, 从而验证了分析结果的正确性.

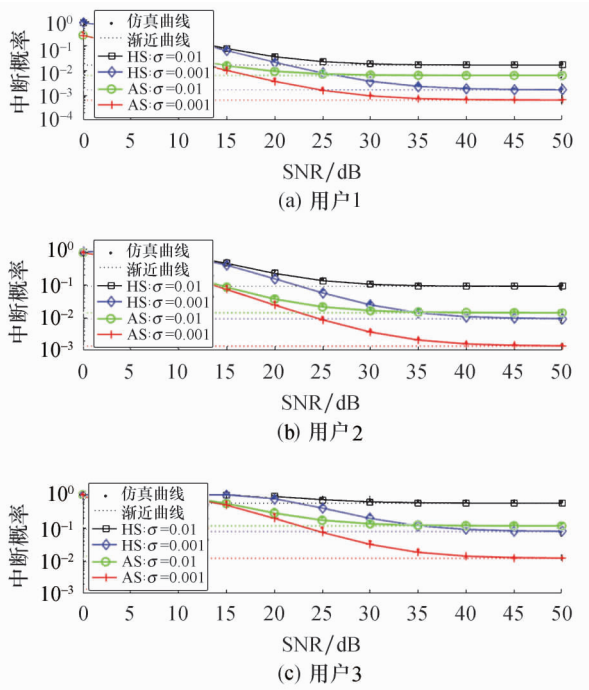


图 3 中断概率随传输 SNR 的变化曲线

Fig.3 The curves of outage probability vs. the transmit SNR

图 4 分析了不同的 Nakagami- m 衰落参数下的中断概率随传输 SNR 的变化规律. 其中, 衰落参数设置为 $m_1 = m_2 = m_3 = \{1, 2\}$, $\sigma = 0.001$. 从图中可以观察到, 在中、高 SNR 区域三个用户的中断概率下界与模拟值基本贴合. 此外, 随着传输 SNR 的增

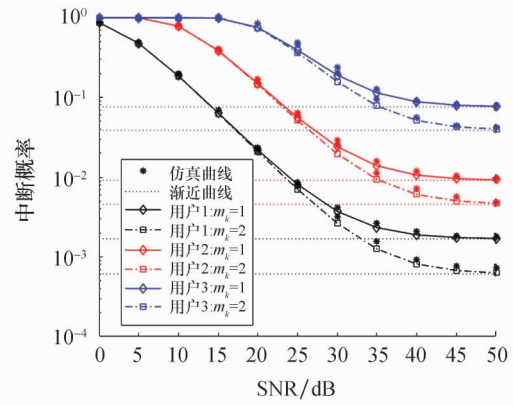


图 4 中断概率随传输 SNR 的变化曲线

加, 中断概率逐渐降低并达到一个固定值, 出现这种现象的原因是受到信道估计误差的影响, 在高 SNR 下的分集阶数变为 0, 这也进一步验证了渐近中断概率的分析结果. 最后, 可以观察到应用 NOMA 策略可以同时为多个用户提供服务, 并且保证了用户的公平性.

图 5 分析了在不同的阴影衰落模式下, 系统吞吐量随传输 SNR 的变化曲线. 在仿真中, 信道估计误差的平均功率值分别设置为 $\{0.001, 0.005, 0.010\}$. 从图中可以观察到, AS 模式下的吞吐量性能要优于 HS 模式, 这是由于在 AS 模式下用户可以获得较好的中断性能, 从而再次验证了图 3 的分析结果. 此外, 当 σ 从 0.001 增大到 0.010 时, 吞吐量的性能下降明显, 特别是在 HS 模式下, 吞吐量有接近 0.5 bit/s/Hz 的下降, 这说明相较于 AS 模式, HS 模式下的吞吐量对信道估计误差的敏感度更高.

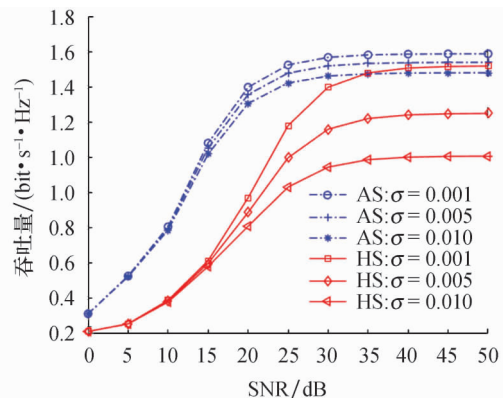


图 5 系统吞吐量随传输 SNR 的变化曲线

Fig.5 The curves of system throughput vs. the transmit SNR

图 6 分析了在不同的阴影衰落模式和信道估计误差条件下, 能量效率随传输 SNR 的变化情况. 在仿真中, 设定 $\kappa = 2, P_T = 50$ W. 可以看出, 当 S 与 R 节点之间通信链路的阴影衰落从重度衰落减弱为中

度衰落时,系统的能量效率性能改善明显,出现这种现象的主要原因是从重度衰落减弱为中度衰落的过程中,接收信号中可视径分量的平均功率 Ω_r 增大将近 558 倍.此外,受到三种不同程度的信道估计误差干扰,能量效率有一定程度的下降.特别是当 σ 从 0.001 增大到 0.010 时,在重度衰落模式下 15 dB 到 30 dB 区间的能量效率性能下降明显.

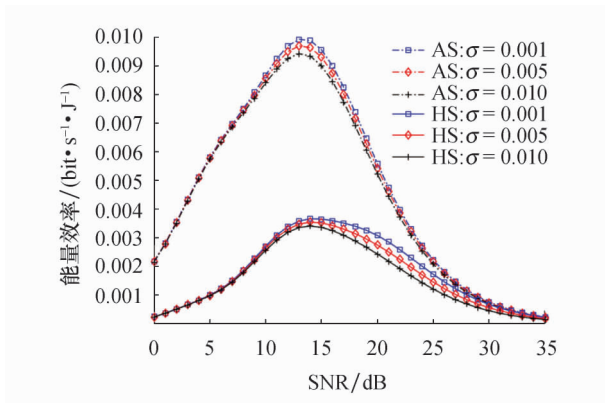


图 6 能量效率随传输 SNR 的变化曲线

Fig.6 The curves of energy efficiency vs. the transmit SNR

4 结论

本文研究了基于 SWIPT NOMA 的星地系统性能,推导了系统排序用户的中断概率下界表达式、渐近中断概率、系统吞吐量以及能量效率,并分析了信道估计误差和不同程度的阴影衰落对系统性能产生的影响.另外,通过蒙特卡洛仿真对比实际的分析结果,验证了理论分析的正确性.研究结果进一步表明,将 NOMA 技术应用到星地网络中能够有效提高频谱效率和用户的公平性.

致谢:本文得到甘肃政法大学校级科研项目(GZF2020XZD14)的资助,在此表示感谢.

参考文献:

[1] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, *et al.* Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access [C]//2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring).Dresden, Germany; [s.n.], 2013:1-5.

[2] DING Z, LEI X, KARAGIANNIDIS G K, *et al.* A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends [J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.

[3] ZHU X, JIANG C, HUANG L, *et al.* Non-orthogonal multiple access based integrated terrestrial-satellite networks [J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2253-2267.

[4] CAUS M, VÁZQUEZ M Á, PÉREZ-NEIRA A. NOMA and interference limited satellite scenarios [C]//2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, US; [s.n.], 2016:497-501.

[5] YAN X, XIAO H, WANG C, *et al.* Performance analysis of NOMA-based land mobile satellite networks [J]. IEEE Access, 2018, 6:31327-31339.

[6] XIE S, ZHANG B, GUO D, *et al.* Outage analysis and optimization of NOMA-based integrated satellite terrestrial system with an AF relay [C]//2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Changchun; [s.n.], 2019:741-746.

[7] XIE S, ZHANG B, GUO D, *et al.* Outage performance of NOMA-based integrated satellite-terrestrial networks with imperfect CSI [J]. Electronics Letters, 2019, 55(14): 793-795.

[8] QI T, FENG W, WANG Y. Outage performance of non-orthogonal multiple access based unmanned aerial vehicles satellite networks [J]. China Communications, 2018, 15(5): 1-8.

[9] LI X, CHEN Y, XUE P, *et al.* Outage performance for satellite-assisted cooperative NOMA systems with coordinated direct and relay transmission [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(10): 2285-2289.

[10] YUE X, LIU Y, YAO Y, *et al.* Outage behaviors of NOMA-based satellite network over shadowed-rician fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6818-6821.

[11] SINGH V, UPADHYAY P K. Cognitive hybrid satellite terrestrial relay networks with simultaneous energy and information transmission [C]//2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). Albany, NY, USA; [s.n.], 2018:1-6.

[12] SINGH V, UPADHYAY P K, COSTA D B D, *et al.* Hybrid satellite terrestrial spectrum sharing systems with RF energy harvesting [C]//2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Bologna, Italy; [s.n.], 2018:306-311.

[13] ZHI C, TENG J L, MOTANI M. HAP-assisted LEO satellite downlink transmission: An energy harvesting perspective [C]//2014 IEEE 15th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Toronto, Canada; [s.n.], 2014:194-198.

[14] DAVID H A. Order statistics [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011:1039-1040.

[15] PATCHARAMANEPAKORN P, WU S, WANG C, *et al.* Spectral, energy, and economic efficiency of 5G multicell massive MIMO systems with generalized spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9715-9731.

[16] YUE X, LIU Y, KANG S, *et al.* Performance analysis of NOMA with fixed gain relaying over Nakagami-*m* fading channels [J]. IEEE Access, 2017, 5:5445-5454.