

# 同信道干扰下 RIS 辅助 MUD-RF/FSO 混构系统性能分析

包朝园, 曹阳\*, 彭小峰, 邢雯璐

重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054

**摘要** 为了解决射频(RF)通信中存在的同信道干扰问题,利用多用户的同时传输产生分集增益,并考虑自由空间光(FSO)通信无法完成视距传输的问题,在 FSO 链路中引入可重构智能表面(RIS)技术,提出一种同信道干扰下 RIS 辅助多用户分集(MUD)-RF/FSO 混构系统方案。其中,具有多用户分集的 RF 链路服从独立同分布的 Rayleigh 分布,光学 RIS 辅助的 FSO 链路服从 Gamma-Gamma 分布,在电光转换中继节点处采用译码转发协议。基于系统端到端瞬时信噪比的概率密度函数及其累计分布函数,推导了系统中断概率和平均误码率的闭合表达式。仿真结果表明,RIS 可以显著提升 MUD-RF/FSO 混构系统的性能。此外,用户数量的增加可以为系统带来分集增益,从而抑制同信道干扰所带来的不良影响。

**关键词** 多用户分集; 可重构智能表面; 中断概率; 平均误码率; 同信道干扰

**中图分类号** TN929.12

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231211

## 1 引言

混合双跳射频(RF)/自由空间光(FSO)通信系统研究方案<sup>[1-2]</sup>由于能够增强多径衰落的鲁棒性、增大通信覆盖的范围,受到了多数研究人员的关注。但是 RF 通信系统中存在同信道干扰(CCI)和频谱局限性问题<sup>[3]</sup>,限制了其高速率业务的发展。对于 RF/FSO 混构系统,CCI 对 RF 链路的影响是不可忽视的。Bambwal 等<sup>[4]</sup>研究了 RF 链路中存在多重 CCI 的混合 RF/FSO 通信系统,给出了中断概率、平均误码率和遍历容量的精确闭合表达式。Petkovic 等<sup>[5]</sup>研究了 CCI 存在下的 RF/FSO 混合中继信道的中断性能,数值结果表明,所得系统中存在一个中断概率下限。以上研究方案都是针对单条 RF 链路和单条 FSO 链路的混构系统进行分析的。Upadhya 等<sup>[6]</sup>提出了一种干扰条件下多用户分集(MUD)的 RF/FSO 混构系统方案,其中 RF 链路服从 Nakagami-m 分布,FSO 链路服从 Gamma-Gamma 分布,中继节点和目的节点处的 CCI 信号服从独立同分布(IID)的 Nakagami-m 衰落,推导了系统端到端的累积分布函数(CDF),并利用该函数得到了整个系统的中断概率和平均误码率的闭合表达

式,仿真结果表明,通过结合 MUD,系统的性能得到了极大的提升。为了提升 RF 链路的性能,Tonk 等<sup>[7]</sup>采用了 MUD 方案,研究了存在 CCI 的混合 RF/FSO 译码转发双向中继系统,导出了中断概率和平均误码率的闭合表达式,并在高信噪比的情况下,进一步简化了闭合表达式。上述文献都证明了 MUD 可以提升 RF 链路的性能。

而 FSO 通信系统属于视距通信,针对点对点 FSO 通信链路中存在遮挡或传输距离过远,从而导致通信中断的问题,现有的解决方案是在 FSO 链路中引入可重构智能表面(RIS)技术<sup>[8]</sup>。光学 RIS 可以反射入射光束,并控制光束的强度、相位和频率等<sup>[9]</sup>。光波波段 RIS 的设计、制造和分析是物理学和材料学中活跃的研究领域<sup>[10-14]</sup>。Saxena 等<sup>[15]</sup>研究了全光双跳 RIS 辅助 FSO 通信系统的性能,使用无人机作为中继节点,结果表明,RIS 可以增大 FSO 通信系统的覆盖范围。Agheli 等<sup>[16]</sup>提出了一种光学 RIS 辅助 FSO 通信系统方案,得出了固定和动态两种光学 RIS 覆盖场景下网络的平均信噪比和中断概率,研究结果表明,与中继辅助的接入网相比,该方案的接入网为每个 FSO 基站提供了高达 63% 的数据传输速率和 446% 的覆盖范围。

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-07-27; 录用日期: 2023-08-03; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 重庆市教委科学技术项目(KJQN201901125)、重庆市教委基金(KJ120827)、重庆市科委社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shmsA40019)、重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2019jcy-msxm X0233)、重庆市研究生科研创新项目(CYS23667)

通信作者: \*1273581499@qq.com

以上方案都表明, RIS可以提升FSO通信系统性能, 而光学RIS在RF/FSO混构系统中也有研究。Wang等<sup>[17]</sup>研究了光学RIS辅助FSO/RF通信系统的性能, 并首次导出了光学RIS辅助FSO/RF系统的精确中断概率、渐进中断概率和平均误码率的封闭解。Kumar等<sup>[18]</sup>研究了三跳RIS辅助RF/FSO与水下无线光通信系统的收敛性能, 分析了系统的平均误码率性能和中断概率性能, 结果表明, 增加RIS元素数量可以提升系统的性能。

基于此, 为了减少CCI信号对RF链路的影响并改善FSO链路的性能, 考虑在RF链路中采用MUD方案, 并在FSO链路中引入光学RIS技术。本文提出一个同信道干扰下RIS辅助MUD-RF/FSO混构系统方案。其中, MUD-RF链路服从IID的Rayleigh分布, 多个CCI信号也服从IID的Rayleigh分布, 光学RIS辅助的FSO链路服从Gamma-Gamma分布, 中继节点处采用译码转发协议, 基于系统端到端瞬时信噪比的概

率密度函数(PDF), 推导了系统的中断概率和平均误码率, 并利用数值仿真分析了不同用户数量和光学RIS反射单元数量对系统性能的影响。结果表明, 增加用户数量和光学RIS反射单元数量都能使系统的性能得到提升。

## 2 系统与信道模型

本文考虑一个RIS辅助RF/FSO混构系统, 其中,  $L$ 个用户通过中继节点R与目的节点D通信, 如图1所示。该系统包括 $L$ 个用户组成的源节点S、一个具备将电信号转化为光信号的中继节点R(在R处考虑采用译码转发协议)、具有 $N$ 个反射元素的光学RIS和目的节点D, R和D处都采用多孔径装置, 且R处存在 $M$ 个CCI。由于R-D之间不存在视距链路, 因此在R-D链路中引入光学RIS使得R将数据传输至D。假设中继节点R可以获取 $L$ 个用户的信道状态信息, 且每次第一轮通信都会从 $L$ 个用户中选取信道质量最好的用户。

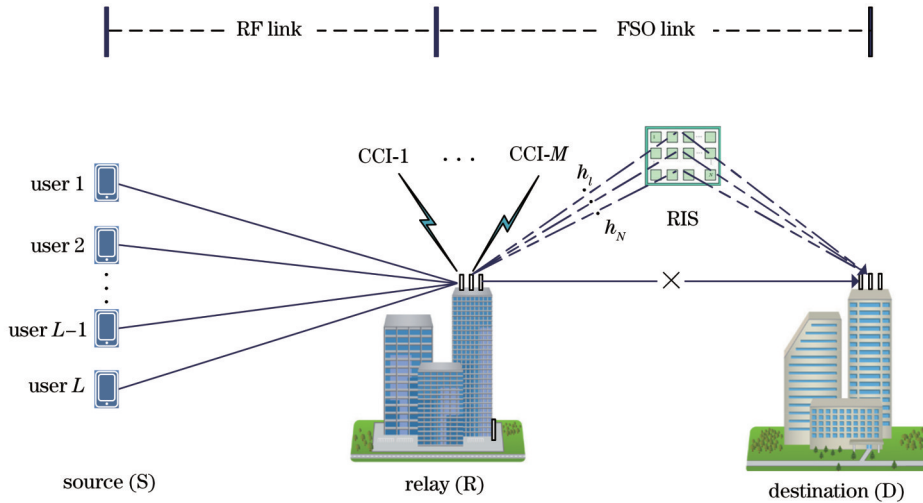


图1 存在干扰的RIS辅助MUD-RF/FSO混构系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the RIS-assisted MUD-RF/FSO hybrid system in the presence of interference

### 2.1 RF链路模型

第一阶段,  $L$ 个用户向R传输数据, 即S和R之间进行第一轮通信。且R处还存在 $M$ 个CCI的影响, 则R处接收到的信号可以表示为

$$y_{SR} = \sqrt{P_{SR}} h_{SR} x_R + \sqrt{P_{R,i}} \sum_{i=1}^M h_{R,i} x_{R,i} + n_{SR}, \quad (1)$$

式中:  $h_{SR}$  和  $x_R$  分别是 $L$ 个用户中信道质量最好的用户和R之间的信道衰减系数和数据传输符号;  $P_{SR}$  是该用户的平均发射功率;  $P_{R,i}$  是R处第 $i$ 个CCI信号的功率;  $h_{R,i}$  和  $x_{R,i}$  分别是第 $i$ 个CCI和R之间的信道衰减系数和数据传输符号;  $n_{SR}$  则是均值为0、方差为 $N_1$ 的加性高斯白噪声。利用式(1)可以得出R处的瞬时信噪比为

$$\gamma_{RF} = \frac{P_{SR} |h_{SR}|^2}{P_{R,i} \sum_{i=1}^M |h_{R,i}|^2 + N_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2 + 1}, \quad (2)$$

式中:  $\gamma_1 = \frac{P_{SR} |h_{SR}|^2}{N_1} = \max_{1 \leq l \leq L} (\gamma_l)$  为 $L$ 个用户中信道质量最好的用户的瞬时信噪比;  $\gamma_l$  为第 $l$ 个用户的瞬时信噪比;  $\gamma_2 = \frac{P_{R,i} \sum_{i=1}^M |h_{R,i}|^2}{N_1}$  为 $M$ 个CCI信号的瞬时信噪比。假定RF链路上的每个用户信道和 $M$ 个CCI信号满足IID的Rayleigh分布, 其相应的PDF<sup>[19]</sup>表示为

$$f_{\gamma_l}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_l} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_l}\right), \quad (3)$$

式中:  $\bar{\gamma}_l$  是用户信号的平均信噪比, 进而可以得出 $\bar{\gamma}_l$  的CDF为

$$F_{\gamma_l}(\gamma) = \int_0^{\gamma} f_{\gamma_l}(x) dx = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_l}\right). \quad (4)$$

由于  $\gamma_1 = \max_{1 \leq l \leq L} (\gamma_l)$ , 利用有序统计量的定义, 根

据下式可以分别得出多用户分集方案下  $\gamma_1$  的 PDF 和 CDF, 表示为

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = L [F_{\gamma_l}(\gamma)]^{L-1} f_{\gamma_l}(\gamma) = L \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_l}\right) \right]^{L-1} \frac{1}{\gamma_l} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_l}\right) = \frac{L}{\gamma_l} \sum_{k=0}^{L-1} \binom{L-1}{k} (-1)^k \exp\left[-\frac{(k+1)\gamma}{\gamma_l}\right], \quad (5)$$

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = [F_{\gamma_l}(\gamma)]^L = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_l}\right) \right]^L = \sum_{k=0}^L \binom{L}{k} (-1)^k \exp\left(-\frac{k\gamma}{\gamma_l}\right). \quad (6)$$

根据  $\gamma_2 = \frac{P_{R,i} \sum_{i=1}^M |h_{R,i}|^2}{N_1} = \sum_{i=1}^M \gamma_{2,i}$ , 其中  $\gamma_{2,i}$  服从 IID 的 Rayleigh 分布, 可以得出  $M$  个 CCI 信号的瞬时信噪比  $\gamma_2$  的 PDF<sup>[20]</sup> 为

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{1}{(M-1)! \bar{\gamma}_{2,i}^{-M}} \gamma^{M-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{2,i}}\right), \quad (7)$$

式中:  $\bar{\gamma}_{2,i}$  是第  $i$  个 CCI 信号的平均信噪比。利用式(5)~(7)可以得出  $\gamma_{RF}$  的 CDF 为

$$F_{\gamma_{RF}}(x) = \Pr\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2 + 1} \leq x\right) = \int_0^\infty F_{\gamma_1}[x(1+\gamma)] f_{\gamma_2}(\gamma) d\gamma = \sum_{k=0}^L \binom{L}{k} (-1)^k \left(\frac{k \bar{\gamma}_{2,i}}{\gamma_l} x + 1\right)^{-M} \exp\left(-\frac{kx}{\gamma_l}\right). \quad (8)$$

## 2.2 FSO 链路模型

第二阶段, 即 R-RIS-D 通信阶段。在 FSO 链路中, 中继节点 R 通过电光转换装置将电信号转换为光信号, 通过 FSO 通道传输至目的节点 D。因此, 节点 D 接收到的信号可以表示为

$$y_{RD} = \eta \sqrt{P_{RD}} \sum_{k=1}^N h_k x_k + n_{RD}, \quad (9)$$

式中:  $\eta$  为电光转换系数;  $P_{RD}$  是传输符号  $x_k$  的平均功率;  $h_k = h_{ak} h_{pk} h_{lk}$  为信道衰落增益,  $h_{ak}$ 、 $h_{pk}$  和  $h_{lk}$  分别表示大气湍流效应、指向误差和大气路径损耗;  $n_{RD}$  是均值为 0、方差为  $N_2$  的加性高斯白噪声。

首先根据文献[21], 得到大气湍流效应  $h_{ak}$  满足 Gamma-Gamma 分布, 对应的 PDF 为

$$f_{h_{ak}}(h_{ak}) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_{ak}^{\left(\frac{\alpha+\beta}{2}-1\right)} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta}h_{ak}\right), \quad (10)$$

式中:  $\alpha = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}$  表示散射环

境中的大尺度参数;  $\beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}$

表示散射环境中的小尺度参数;  $\exp[\cdot]$  表示指数

函数;  $\sigma_R^2 = 1.23k^{7/6} C_n^2 d^{11/6}$  是 Rytov 方差;  $C_n^2$  为折射率结构参数;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  是光波数,  $\lambda$  为激光波长;  $d$  是激光传输距离;  $\Gamma(\cdot)$  表示伽马函数;  $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$  是第二类修正贝塞尔函数。

然后根据文献[22], 已知指向误差会受到波束抖动和智能通道可重构节点(ICRN)抖动的影响, 其中波束抖动是由于发射机的抖动引起的波束振动, ICRN 抖动则是由于 ICRN 面抖动引起的反射面法向量偏转。考虑这两种抖动的影响, 指向误差  $h_{pk}$  的 PDF 可以表示为

$$f_{h_{pk}}(h_{pk}) = \frac{C}{A_0} \left(\frac{h_{pk}}{A_0}\right)^{C-1}, \quad 0 < h_{pk} < A_0, \quad (11)$$

式中:  $C = \frac{\omega_{zeq}^2}{4\sigma_\theta^2(L_1+L_2)^2 + 16\sigma_\beta^2 L_2^2}$  为指向误差系数;

$\omega_{zeq}^2 = \omega_z^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(u)}{2u \exp(-u^2)}$ ,  $u = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{a_z}{\omega_z}$  为孔径半径和光束

宽度的比值,  $\operatorname{erf}(\cdot)$  是误差函数,  $\omega_z$  是光束宽度;  $\sigma_\theta$  和  $\sigma_\beta$  分别表示指向误差角和 ICRN 偏转误差角的标准差;  $L_1$  和  $L_2$  分别为 R 到 RIS 的距离和 RIS 到 D 的距离, 假设  $L = L_1 + L_2$ ,  $A_0 = [\operatorname{erf}(u)]^2$ 。最后假定大气路径损耗  $h_{lk}$  为常数 1。根据式(9), D 处的瞬时信噪比为

$$\gamma_{FSO} = \frac{\eta^2 P_{RD} \sum_{k=1}^N |h_k|^2}{N_2}, \quad (12)$$

式中: 令  $\gamma_3 = \frac{\eta^2 P_{RD} \sum_{k=1}^N |h_k|^2}{N_2} = \sum_{k=1}^N \gamma_k =$

$\bar{\gamma} \sum_{k=1}^N |h_k|^2$ ,  $\bar{\gamma} = \frac{\eta^2 P_{RD}}{N_2}$ ,  $\gamma_k$  表示 RIS 辅助 FSO 链路中

第  $k$  个光通道的瞬时信噪比。假定 FSO 链路上的每个信道满足 IID 的 Gamma-Gamma 分布, 令  $H = |h_k|^2$ , 由于  $h_k = h_{ak} h_{pk} h_{lk}$ , 利用文献[23]可以得出其 PDF 为

$$f_H(x) = \frac{\alpha\beta C}{2\sqrt{x} A_0 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1.3}^{3.0} \left( \frac{\alpha\beta\sqrt{x}}{A_0} \middle| C-1, \alpha-1, \beta-1 \right), \quad (13)$$

式中:  $G_{p,q}^{m,n} \left( x \middle| a_1, \dots, a_p \right)$  表示 Meijer's G 函数, 紧接着可以求出  $H$  的均值和方差分别为

$$\mu = E(H) = \int_0^\infty x f_H(x) dx = \frac{CA_0 \Gamma(C+2) \Gamma(\alpha+2) \Gamma(\beta+2)}{\alpha^2 \beta^2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(C+3)}, \quad (14)$$

$$\delta^2 = \text{VAR}(H) = E(H^2) - [E(H)]^2 = \int_0^\infty x^2 f_H(x) dx - \mu^2 = \frac{CA_0^4 \Gamma(C+4) \Gamma(\alpha+4) \Gamma(\beta+4)}{\alpha^4 \beta^4 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(C+5)} - \mu^2. \quad (15)$$

根据式(13)可知  $\gamma_k$  的 PDF 为

$$f_{\gamma_k}(\gamma) = \frac{\alpha\beta C}{2\sqrt{\gamma} \sqrt{\gamma} A_0 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{1.3}^{3.0} \left( \frac{\alpha\beta\sqrt{\gamma}}{A_0\sqrt{\gamma}} \middle| C-1, \alpha-1, \beta-1 \right). \quad (16)$$

对上式使用中心极限定理(CLT), 假设  $N$  的值较大, 可以得出  $\gamma_3$  的 PDF 为

$$f_{\gamma_3}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_{\gamma_3}^2}} \exp \left[ -\frac{(\gamma - \mu_{\gamma_3})^2}{2\delta_{\gamma_3}^2} \right], \quad (17)$$

式中:  $\mu_{\gamma_3} = N\mu$ ;  $\delta_{\gamma_3}^2 = N\delta^2$ . 根据式(17)可以得出  $\gamma_{\text{FSO}}$  的 CDF 为

$$F_{\gamma_{\text{FSO}}}(x) = \Pr(\gamma_3 \leq x) = \int_0^x f_{\gamma_3}(\gamma) d\gamma = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_{\gamma_3}^2}} \exp \left[ -\frac{(\gamma - \mu_{\gamma_3})^2}{2\delta_{\gamma_3}^2} \right] d\gamma = \Phi \left( \frac{x - \mu_{\gamma_3}}{\delta_{\gamma_3}} \right) - \Phi \left( \frac{-\mu_{\gamma_3}}{\delta_{\gamma_3}} \right), \quad (18)$$

式中:  $\Phi(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$  表示标准正态分布的分布函数。

### 3 系统性能分析

在本节中, 导出系统的中断概率和平均误码率作为衡量系统性能的重要指标。

#### 3.1 中断概率分析

通过对系统和信道模型的分析, 得到了 RF 链路

和 FSO 链路瞬时信噪比的 PDF 和 CDF, 在中继节点 R 处考虑使用译码转发协议, 故得到系统端到端的中断概率为

$$P_{\text{out}} = \Pr \left[ \min(\gamma_{\text{RF}}, \gamma_{\text{FSO}}) \leq \gamma_{\text{th}} \right] = 1 - [1 - F_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma_{\text{th}})][1 - F_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma_{\text{th}})], \quad (19)$$

式中:  $\gamma_{\text{th}}$  表示阈值门限值。将式(8)和式(18)代入式(19)中, 即可得到中断概率的闭合表达式为

$$P_{\text{out}} = 1 - \left[ 1 - \sum_{k=0}^L \binom{L}{k} (-1)^k \left( \frac{k\bar{\gamma}_{2,i}}{\gamma_l} \gamma_{\text{th}} + 1 \right)^{-M} \exp \left( -\frac{k\gamma_{\text{th}}}{\gamma_l} \right) \right] \times \left[ 1 - \Phi \left( \frac{\gamma_{\text{th}} - \mu_{\gamma_3}}{\delta_{\gamma_3}} \right) + \Phi \left( \frac{-\mu_{\gamma_3}}{\delta_{\gamma_3}} \right) \right]. \quad (20)$$

#### 3.2 平均误码率分析

系统的平均误码率可表示为

$$P_{\text{BER}} = P_{\text{RF}} + P_{\text{FSO}} - 2P_{\text{RF}}P_{\text{FSO}}, \quad (21)$$

式中:  $P_{\text{RF}}$  为 RF 链路的平均误码率;  $P_{\text{FSO}}$  为 FSO 链路的平均误码率。根据文献[24]可知, RF 链路的平均误码率为

$$P = \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \int_0^\infty \exp(-ax) x^{b-1} F(x) dx, \quad (22)$$

式中:  $a$  和  $b$  的不同取值代表不同的二进制调制方式。  $a=1, b=0.5$  为二进制相移键控(BPSK)调制;  $a=0.5, b=0.5$  为相干二进制频移键控(BFSK)调制;  $a=0.25, b=0.5$  为开关键控(OOK)调制。将式(8)

代入到式(22)中, 可以表示出 RF 链路的平均误码率为

$$P_{\text{RF}} = \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \int_0^\infty \exp(-ax) x^{b-1} \sum_{k=0}^L \binom{L}{k} (-1)^k \left( \frac{k\bar{\gamma}_{2,i}}{\gamma_l} x + 1 \right)^{-M} \exp \left( -\frac{kx}{\gamma_l} \right) dx. \quad (23)$$

为了得出式(23)的闭合解, 根据文献[25]中的

(07.34.03.0271.01) 可以将  $\left( \frac{k\bar{\gamma}_{2,i}}{\gamma_l} x + 1 \right)^{-M}$  表示成 Meijer's G 函数, 最后再利用文献[25]中的



(07.34.21.0088.01)可以计算出 RF 链路的平均误码率为

$$P_{\text{RF}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\Gamma(b)} + \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \sum_{k=1}^L \binom{L}{k} \frac{(-1)^k}{\Gamma(M)} \left( a + \frac{k}{\gamma_l} \right)^{-b} G_{2,1}^{1,2} \left( \frac{k\bar{\gamma}_{2,i}}{a\bar{\gamma}_l + k} \middle| \begin{matrix} 1-b, -M+1 \\ 0 \end{matrix} \right). \quad (24)$$

对于 FSO 链路,根据文献[26],可以用下式表达 FSO 链路的平均误码率

$$P = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2gx}) f(x) dx, \quad (25)$$

式中:  $Q(\cdot)$  为标准正态分布的右尾函数;  $g$  表示不同调制方法的系数。当  $g=1$  时,表示 BPSK 调制方案;当  $g=0.5$  时,表示 BFSK 调制方案;当  $g=0.25$  时,表示 OOK 调制方案。利用分步积分法,即有

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2gx}) dF(x) &= 0 - \int_0^{\infty} F(x) d\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{gx}) = -\frac{1}{2} \int_0^{\infty} F(x) d[1 - \operatorname{erf}(\sqrt{gx})] = \\ &= -\frac{1}{2} \int_0^{\infty} F(x) \left( 0 - \frac{2e^{-gx}}{\sqrt{\pi}} \right) \frac{g}{2\sqrt{gx}} dx = \frac{g^{0.5}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-gx} (x)^{-0.5} F(x) dx, \end{aligned} \quad (26)$$

式中:  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数。可以看出,式(22)与式(25)之间存在等价关系。

接着将式(17)代入到式(25)中,可以表示出 FSO 链路的平均误码率为

$$P_{\text{FSO}} = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2gx}) \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_{\gamma_s}^2}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_{\gamma_s})^2}{2\delta_{\gamma_s}^2}\right] dx. \quad (27)$$

将式(27)中的  $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$ ,  $\operatorname{erfc}(x) \simeq \frac{1}{6} \exp(-x^2) + \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{4x^2}{3}\right)$ , 根据正态分布中 PDF 与 CDF 之

间的关系,可以近似得到 FSO 链路的平均误码率为

$$P_{\text{FSO}} \approx \frac{1}{12} \exp(0.5g^2\delta_{\gamma_s}^2 - g\mu_{\gamma_s}) \left[ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_{\gamma_s} - g\delta_{\gamma_s}^2}{\delta_{\gamma_s}}\right) \right] + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{8}{9}g^2\delta_{\gamma_s}^2 - \frac{4}{3}g\mu_{\gamma_s}\right) \left[ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_{\gamma_s} - \frac{4}{3}g\delta_{\gamma_s}^2}{\delta_{\gamma_s}}\right) \right]. \quad (28)$$

最后将式(24)和式(28)代入到式(21)中,即可近似得到系统平均误码率为

$$\begin{aligned} P_{\text{BER}} &= \frac{\sqrt{\pi}}{2\Gamma(b)} + \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \sum_{k=1}^L \binom{L}{k} \frac{(-1)^k}{\Gamma(M)} \left( a + \frac{k}{\gamma_l} \right)^{-b} G_{2,1}^{1,2} \left( \frac{k\bar{\gamma}_{2,i}}{a\bar{\gamma}_l + k} \middle| \begin{matrix} 1-b, -M+1 \\ 0 \end{matrix} \right) + \\ &= \frac{1}{12} \exp(0.5g^2\delta_{\gamma_s}^2 - g\mu_{\gamma_s}) \left[ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_{\gamma_s} - g\delta_{\gamma_s}^2}{\delta_{\gamma_s}}\right) \right] + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{8}{9}g^2\delta_{\gamma_s}^2 - \frac{4}{3}g\mu_{\gamma_s}\right) \times \\ &= \left[ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_{\gamma_s} - \frac{4}{3}g\delta_{\gamma_s}^2}{\delta_{\gamma_s}}\right) \right] - 2 \left[ \frac{\sqrt{\pi}}{2\Gamma(b)} + \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \sum_{k=1}^L \binom{L}{k} \frac{(-1)^k}{\Gamma(M)} \left( a + \frac{k}{\gamma_l} \right)^{-b} \times \right. \\ &= G_{2,1}^{1,2} \left( \frac{k\bar{\gamma}_{2,i}}{a\bar{\gamma}_l + k} \middle| \begin{matrix} 1-b, -M+1 \\ 0 \end{matrix} \right) \left. \left\{ \frac{1}{12} \exp(0.5g^2\delta_{\gamma_s}^2 - g\mu_{\gamma_s}) \left[ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_{\gamma_s} - g\delta_{\gamma_s}^2}{\delta_{\gamma_s}}\right) \right] + \right. \right. \\ &= \left. \frac{1}{4} \exp\left(\frac{8}{9}g^2\delta_{\gamma_s}^2 - \frac{4}{3}g\mu_{\gamma_s}\right) \left[ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_{\gamma_s} - \frac{4}{3}g\delta_{\gamma_s}^2}{\delta_{\gamma_s}}\right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (29)$$

## 4 仿真分析

基于本文所推导的中断概率和平均误码率的闭合表达式,以下将通过数值仿真分析用户数量、CCI 信号

的个数、CCI 信号的信噪比、光学 RIS 反射单元数量、阈值门限、孔径半径、光束宽度、指向误差角、不同调制方式及 ICRN 偏转误差角的标准差对系统性能的影响,表 1 列出了仿真过程中保持不变的参数。

表 1 仿真参数配置

Table 1 Configuration of simulation parameters

Parameter	Numerical value
FSO link wavelength /nm	1550
$\eta$	0.9
$L_1$ /m	150
$L_2$ /m	150
Weak turbulence intensity	$\alpha = 5, \beta = 3$
Medium turbulence intensity	$\alpha = 4.4, \beta = 2.5$
Strong turbulence intensity	$\alpha = 4, \beta = 1.9$

在强湍流条件下,为了研究不同的  $L$  和  $M$  对系统中断概率的影响,固定 FSO 链路的信噪比为 50 dB,其中,  $N=4, \gamma_{th}=1$  dB,  $a=0.15$  m,  $\omega_z=1.2$  m,  $\sigma_\theta=1$  mrad,  $\sigma_\beta=0.5$  mrad, 如图 2 所示。可以看出,随着 RF 链路信噪比的提高,系统的中断概率逐渐减小。在相同的干扰数量下,当干扰的信噪比增加时,系统的中断概率变大;在相同的干扰信噪比下,当干扰的数量增多时,系统的中断概率也会变大,说明干扰的数量变大及对应的干扰信噪比提高会导致系统的性能恶化。而当用户的数量从  $L=1$  变为  $L=2$  时,系统的中断概率性能得到了巨大的提升,这是由于多用户的同时传输产生分集增益。对比分析  $L=1, M=2, CCI$  为 2 dB 和  $L=2, M=4, CCI$  为 2 dB, 由图 2 可知, 后者的中断概率性能更优, 说明了多用户的分集增益可以抑制干扰信号对系统的不良影响, 并为系统的中断概率性能带来进一步提升。

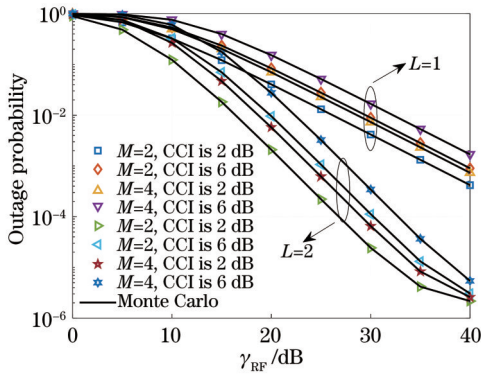


图 2 不同用户数量、干扰数量及其信噪比对系统中断概率的影响

Fig.2 Effect of different numbers of users, numbers of interferences, and their signal-to-noise ratios on system outage probability

为了研究不同  $N$  和  $\gamma_{th}$  对系统中断概率的影响,在强湍流条件下,固定 RF 链路的信噪比为 50 dB,其中,  $L=1, M=2, CCI$  为 2 dB,  $a=0.15$  m,  $\omega_z=1.2$  m,  $\sigma_\theta=1$  mrad,  $\sigma_\beta=0.5$  mrad, 如图 3 所示。当阈值门限  $\gamma_{th}$  从 4 dB 下降到 1 dB,  $N=8$ , 中断概率的值为  $10^{-3}$  时,系统有 3 dB 左右的增益,说明阈值门限不同的取

值对系统性能存在较大影响。当 FSO 链路的信噪比大于 50 dB 时,系统中断概率基本保持不变,说明此时 RF 链路起主导作用。在相同阈值门限条件下,随着光学 RIS 上的反射元素数值  $N$  的增加,系统的中断概率逐渐下降,这是由于  $N$  可以提高 FSO 链路的信道质量,从而提升系统的性能。

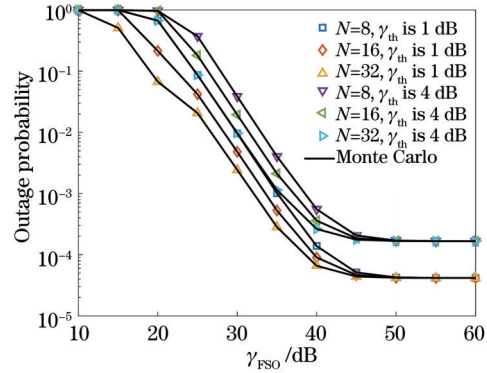


图 3 不同反射元素个数和阈值门限对系统中断概率的影响  
Fig.3 Effect of different numbers of reflective elements and threshold thresholds on the system outage probability

为了比较不同的孔径半径和光束宽度比值对系统中断概率的影响,固定 RF 链路的信噪比和 FSO 链路信噪比都为 30 dB,其中,  $L=1, M=2, N=16, CCI$  为 2 dB,  $\gamma_{th}=4$  dB,  $\sigma_\theta=1$  mrad,  $\sigma_\beta=0.5$  mrad, 如图 4 所示。随着孔径半径和光束宽度比值的提高,系统中断概率随之减小。当湍流强度从弱湍流强度变为强湍流强度时,系统的性能恶化,说明湍流强度会对 FSO 链路产生较大影响。

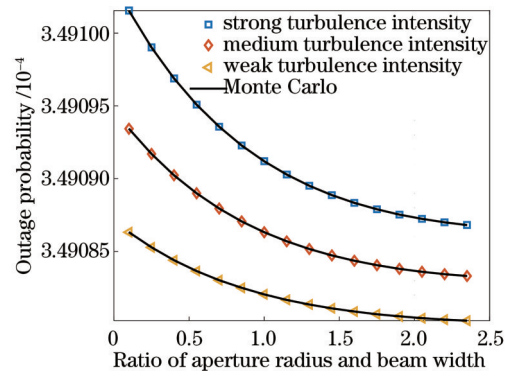


图 4 不同孔径半径和光束宽度比值对系统中断概率的影响  
Fig.4 Effect of different ratios of aperture radius and beam width on system outage probability

为了比较不同调制方式对系统平均误码率的影响,在强湍流条件下,固定 FSO 链路信噪比为 30 dB,另外,  $L=3, M=2, N=128, CCI$  为 2 dB,  $a=0.15$  m,  $\omega_z=1.3$  m,  $\sigma_\theta=1$  mrad,  $\sigma_\beta=0.5$  mrad, 如图 5 所示。可以清楚地看出, BPSK 调制方式性能最佳, OOK 调制方式性能最差。因此,在后续的平均误码率仿真分

析中,均采用BPSK调制方式。

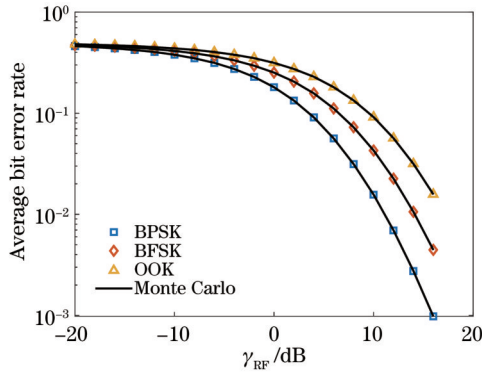


图5 不同调制方式对系统平均误码率的影响

Fig. 5 Effect of different modulation methods on the average bit error rate of the system

在强湍流条件下,针对不同的 $L$ 和 $M$ 对系统平均误码率的影响,固定FSO链路的信噪比为30 dB,其中, $N=128$ ,CCI为2 dB, $a=0.15$  m, $\omega_z=1.3$  m, $\sigma_\theta=1$  mrad, $\sigma_\beta=0.5$  mrad,如图6所示。当用户数量 $L=3$ ,干扰信号的数量从1变为2,系统的平均误码率处于 $10^{-3}$ 时,系统的性能会有2 dB左右的损失,说明干扰信号数量变多会严重影响系统的性能,这与中断概率仿真验证所得的结论相同。在干扰信号的数量及其他条件保持不变的情况下,当用户数量增多时,系统的性能会有明显的改善,这是分集增益所带来的系统性能提升。

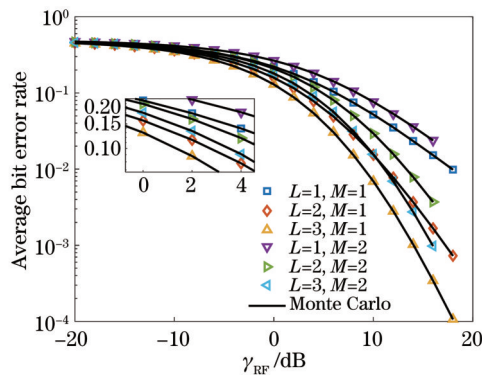


图6 不同用户数量和干扰信号数量对系统平均误码率的影响  
Fig. 6 Effect of different numbers of users and interfering signals on the average bit error rate of the system

为了得出不同的 $\sigma_\theta$ 和 $\sigma_\beta$ 对系统平均误码率的影响,在强湍流条件下,固定RF链路的信噪比为20 dB,其中, $L=2$ , $M=1$ , $N=128$ ,CCI为4 dB, $a=0.1$  m, $\omega_z=1.2$  m,如图7所示。可以看出,随着FSO链路信噪比的提高,系统的平均误码率逐渐减小,当FSO链路的信噪比达到40 dB时,系统的平均误码率基本不变,说明系统的平均误码率性能主要受RF链路的影响,这个结论也与中断概率分析中的结果基本一致。当 $\sigma_\beta$ 和 $\sigma_\theta$ 的值越小时,所对应的 $C$ 值也就越大,系统的

平均误码率对应的值越小,即指向误差系数越大,系统的性能越好。

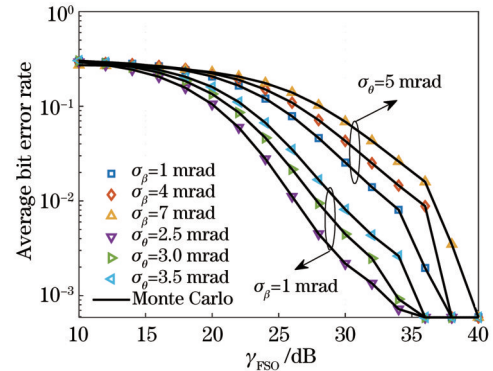


图7 不同指向误差角和ICRN偏转误差角的标准差对系统平均误码率的影响

Fig. 7 Effect of standard deviation of different pointing error angles and ICRN deflection error angles on the average bit error rate of the system

## 5 结 论

本文对同信道干扰下RIS辅助MUD-RF/FSO混构系统进行了性能分析。其中,RF链路服从Rayleigh分布,存在CCI的RF链路也服从Rayleigh分布,中继节点处采用译码转发协议,光学RIS辅助的FSO链路服从Gamma-Gamma分布。本文推导并分析了系统中断概率和平均误码率的闭合公式,并进行了数值分析。仿真结果表明,高信噪比下RF链路起主导作用。干扰信号数量及其对应的信噪比都会对系统性能有着不同程度的影响,而用户数量的增加可以减弱干扰对系统的不良影响。RIS反射单元的数量增多、孔径半径和光束宽度的比值提高、湍流强度变弱、阈值门限值减小及指向误差角和ICRN偏转误差角的标准差降低都可以提升系统的性能。另外,采用BPSK调制系统性能最好。

## 参 考 文 献

- [1] 赵静,赵尚弘,赵卫虎,等.大气湍流和指向误差下混合RF/FSO航空通信系统性能分析[J].中国激光,2017,44(9):0906001.  
Zhao J, Zhao S H, Zhao W H, et al. Performance analysis for mixed RF/FSO airborne communication systems over atmospheric turbulence and pointing error[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0906001.
- [2] 张韵,王翔,赵尚弘.2x2中继混合射频/自由空间光航空通信系统性能分析[J].光学学报,2019,39(3):0301003.  
Zhang Y, Wang X, Zhao S H. Performance analysis of 2x2 relay-assisted mixed radio frequency/free space optical airborne communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0301003.
- [3] Wang Z, Shi W X, Liu W. Two-way mixed RF/FSO relaying system in the presence of co-channel interference[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 7902516.
- [4] Bambiwal S B, Upadhy A, Yaduvanshi R S, et al. Partial relay selection for combating the effects of co-channel

- interference in RF/FSO cooperative relaying[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126186.
- [5] Petkovic M I, Cvetkovic A M, Djordjevic G T, et al. Outage performance of the mixed RF/FSO relaying channel in the presence of interference[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(2): 2999-3014.
- [6] Upadhyaya A, Dwivedi V K, Singh G. Multiuser diversity for mixed RF/FSO cooperative relaying in the presence of interference[J]. Optics Communications, 2019, 442: 77-83.
- [7] Tonk V K, Upadhyaya A, Yadav P K, et al. Mixed MUD-RF/FSO two way decode and forward relaying networks in the presence of co-channel interference[J]. Optics Communications, 2020, 464: 125415.
- [8] Boulogeorgos A A A, Alexiou A. Performance analysis of reconfigurable intelligent surface-assisted wireless systems and comparison with relaying[J]. IEEE Access, 2020, 8: 94463-94483.
- [9] Choudhury S M, Wang D, Chaudhuri K, et al. Material platforms for optical metasurfaces[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 959-987.
- [10] Minovich A E, Miroshnichenko A E, Bykov A Y, et al. Functional and nonlinear optical metasurfaces[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(2): 195-213.
- [11] Nemati A, Wang Q, Hong M H, et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. Opto-Electronic Advances, 2018, 1(5): 180009.
- [12] Luo X G. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics[J]. Advanced Materials, 2019, 31(4): 1804680.
- [13] Du K, Li P, Miao Q W, et al. Optical characteristics of metasurfaces at meta-atom anapole[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 4600107.
- [14] Shen Z, Li R, Xue Y Z, et al. Generation of optical vortices with polarization-insensitive metasurfaces[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 4601010.
- [15] Saxena P, Chung Y H. On the performance of all-optical RORIS dual hop UAV based FSO systems[J]. ICT Express, 2023, 9(3): 466-472.
- [16] Agheli P, Beyranvand H, Emadi M J. High-speed trains access connectivity through RIS-assisted FSO communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(21): 7084-7094.
- [17] Wang H B, Zhang Z C, Zhu B C, et al. Performance analysis of hybrid RF-reconfigurable intelligent surfaces assisted FSO communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(12): 13435-13440.
- [18] Kumar L B, Naik R P, Krishnan P, et al. RIS assisted triple-hop RF-FSO convergent with UWOC system[J]. IEEE Access, 2022, 10: 66564-66575.
- [19] Bag B, Das A, Ansari I S, et al. Performance analysis of hybrid FSO systems using FSO/RF-FSO link adaptation[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 7904417.
- [20] Simon M K, Alouini M S. Digital communication over fading channels: a unified approach to performance analysis[M]. New York: Wiley, 2000.
- [21] Nguyen T V, Le H D, Pham A T. On the design of RIS-UAV relay-assisted hybrid FSO/RF satellite-aerial-ground integrated network[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(2): 757-771.
- [22] Wang H B, Zhang Z C, Zhu B C, et al. Performance of wireless optical communication with reconfigurable intelligent surfaces and random obstacles[EB/OL]. (2020-01-16)[2023-06-30]. <https://arxiv.org/abs/2001.05715>.
- [23] Gappmair W. Further results on the capacity of free-space optical channels in turbulent atmosphere[J]. IET Communications, 2011, 5(9): 1262-1267.
- [24] 黎赛, 杨亮, 崔琪楣, 等. RIS 辅助的混合 RF/THz 系统性能分析[J]. 通信学报, 2022, 43(1): 49-58.
- Li S, Yang L, Cui Q M, et al. Performance analysis of RIS-assisted mixed RF/THz system[J]. Journal on Communications, 2022, 43(1): 49-58.
- [25] Wolfram Function Site. Meijer-G functions[EB/OL]. (2009-05-15) [2023-06-30]. <https://functions.wolfram.com/HypergeometricFunctions/MeijerG/>.
- [26] Yang L, Guo W, Costa D B D, et al. Free-space optical communication with reconfigurable intelligent surfaces[EB/OL]. (2020-11-17)[2023-06-30]. <https://arxiv.org/abs/2012.00547>.

## Performance Analysis of RIS-Assisted MUD-RF/FSO Hybrid System Under Co-Channel Interference

Bao Chaoyuan, Cao Yang\*, Peng Xiaofeng, Xing Wenjun

School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

### Abstract

**Objective** Research on hybrid dual-hop radio frequency (RF)/free-space optical communication systems can improve the multipath fading robustness and communication coverage. However, since the co-channel interference problem in RF communication systems cannot be ignored, the adoption of a multi-user diversity scheme can improve the adverse interference effect and enhance the system performance. Meanwhile, optical reconfigurable intelligent surface (RIS) is introduced in the free-space optical (FSO) communication link to enhance the signal quality when the FSO communication cannot fulfill the conditions of line-of-sight communication.

**Methods** To improve the co-channel interference in RF communication, we utilize the simultaneous transmission of multiple users to generate diversity gain and consider the problem that FSO communication cannot complete line-of-sight transmission. Additionally, RIS technology is introduced in the FSO link to put forward a scheme of RIS-assisted MUD-RF/FSO hybrid system under co-channel interference. The RF link with multi-user diversity obeys the independent



homogeneous Rayleigh distribution, the optical RIS-assisted FSO link obeys the Gamma-Gamma distribution, and the decode-and-forward protocol is adopted at the electro-optical conversion relay node. Based on the probability density function (PDF) of the system's end-to-end instantaneous signal to noise ratio (SNR) and its cumulative distribution function (CDF), closed expressions for the system outage probability and average bit error ratio (BER) are derived. Simulation results show that RIS can significantly improve the performance of the MUD-RF/FSO hybrid system, and the increasing user number can bring diversity gain to the system, thus suppressing the undesirable effects caused by co-channel interference.

**Results and Discussions** In strong turbulence conditions, the SNR of the FSO link is fixed at 50 dB to study the effect of different  $L$  and  $M$  on the outage probability of the system. The outage probability performance of the system is dramatically improved when the user number is changed from  $L=1$  to  $L=2$ . This is attributed to the simultaneous transmission of multiple users generating a diversity gain (Fig. 2). Meanwhile, the SNR of the RF link is fixed to be 50 dB under strong turbulence to study the effect of different numbers of RIS reflection element surfaces and threshold values on the system interruption probability. When the threshold value is decreased from 4 dB to 1 dB with  $N=8$ , the system has a gain of about 3 dB under the interruption probability of  $10^{-3}$ , indicating a great effect of different threshold values on the system performance. When the SNR of the FSO link is greater than 50 dB, the system interruption probability remains basically unchanged, which shows that the RF link plays a dominant role at this time. Under the same threshold, with the rising reflective elements on the optical RIS, the interruption probability of the system gradually decreases, which is because the increase in reflective elements can improve the channel quality of the FSO link and enhance the system performance (Fig. 3). The SNR of the RF link and FSO link are both fixed at 30 dB to compare the effect of different aperture radii and beam widths on the system outage probability. As the ratio of the aperture radius and the beam width increases, the system outage probability decreases. The system performance deteriorates when the turbulence intensity changes from weak turbulence intensity to strong turbulence intensity, indicating that the turbulence intensity can exert great influence on the FSO link (Fig. 4). To determine the effect of standard deviations of different pointing error angles and intelligent channel reconfigurable node (ICRN) deflection error angles on the average bit error rate of the system, we set the SNR of a fixed RF link as 20 dB in strong turbulence conditions. The smaller standard deviation of the pointing error angle and ICRN deflection error angle leads to a smaller corresponding value of the average bit error rate of the system, and the larger pointing error coefficient brings better system performance (Fig. 7).

**Conclusions** We analyze the performance of the RIS-assisted MUD-RF/FSO hybrid system under co-channel interference. RF links obey Rayleigh distribution, RF links in the presence of CCI also obey Rayleigh distribution, decode-and-forward protocol is employed at relay nodes, and optical RIS-assisted FSO links obey Gamma-Gamma distribution. Meanwhile, the closed formulas for the system outage probability and average BER are derived and analyzed numerically. The simulation results show that the RF links play a dominant role at high SNR. The number of interfering signals and their corresponding SNRs have different degrees of influence on the system performance, while the increase in the user number can attenuate the adverse interference effects on the system. The system performance can be enhanced by increasing the number of RIS reflection units, improving the ratio of the aperture radius to the beamwidth, weakening the turbulence intensity, decreasing the threshold value, and lowering the standard deviation of the pointing error angle and the ICRN deflection error angle. Additionally, the best system performance is obtained by BPSK modulation.

**Key words** multi-user diversity; reconfigurable intelligent surfaces; outage probability; average bit error rate; co-channel interference