

同信道干扰下 RIS 辅助 FSO-RF 混构系统性能分析

曹阳, 包朝园, 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 针对自由空间光(FSO)通信无法进行视距传输的问题,在 FSO 链路中引入可重构智能表面(RIS)技术,并考虑射频(RF)链路中的同信道干扰(CCI)信号,提出一种 CCI 下 RIS 辅助 FSO-RF 混构系统研究方案。其中 FSO 链路和 RF 链路分别服从 Gamma-Gamma 分布和 Rayleigh 分布,在光电转换中继节点处采用译码转发协议,以减少噪声对信号的干扰。基于系统端到端瞬时信噪比的概率密度函数,推导了系统中断概率和平均误码率的闭合表达式,采用蒙特卡罗仿真验证了结果的准确性。研究表明,相较于传统的混合 FSO/RF 系统,RIS 能明显提升系统的性能。另外,根据系统的分集顺序,得出系统的性能主要与 FSO 链路的衰落参数、光检测方式和指向误差有关。

关键词 光纤光学; 可重构智能表面; 同信道干扰; 中断概率; 平均误码率; 译码转发协议

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230876

1 引言

射频(RF)通信系统存在的频谱局限和同信道干扰(CCI)问题,限制了高速率业务的发展。自由空间光(FSO)通信具有无需申请频谱许可、抗干扰能力强和易于部署的特点^[1-2]。但是,FSO 通信系统易受到大气湍流和指向误差的影响,从而导致通信链路恶化乃至中断。目前,研究人员利用多种技术方案来改善 FSO 通信系统的性能,例如空间分集技术^[3]、孔径平均技术^[4]、RF/FSO 混构系统方案^[5-6]等。

随着无线通信技术的不断发展,可重构智能表面(RIS)^[7]技术成为当前的研究热点。RIS 由许多无源和低成本元件组成,可以灵活地部署在无线通信传播环境中,并且能够控制撞击信号的幅度、相位和频率,而无需复杂的编译码过程。为了缓解 RF 通信系统中的干扰问题和扩大拥塞网络的覆盖范围,在 RF 链路中引入了 RIS 技术^[8]。Yang 等^[9]分析了基于 RIS 的双跳混合 FSO/RF 系统的性能,发现在 RF 链路中引入 RIS 可以显著提升系统的性能。Li 等^[10]研究了 RIS 辅助 RF/UMOC 系统的性能,通过中断概率(OP)和平均误码率(BER)的渐进表达式,推导了系统的分集阶数,证明了 RIS 辅助系统能够有效提高混合双跳 RF/UMOC 系统的性能。Padhan 等^[11]分析了 RIS 辅助 PLC/RF 系统在智能电网应用中的性能,结果表明,

RIS 可以降低所考虑系统的 BER。由于频谱资源的重复使用,CCI 会严重降低接收信号的质量^[12],因此分析其对通信系统的影响尤为重要。Petkovic 等^[13]研究了 CCI 影响下的混合 RF/FSO 系统的 OP 性能,并假定中继节点处存在多个 CCI,其中 RF 链路遵循 Nakagami-m 分布,FSO 链路考虑了具有大气湍流效应和指向误差影响的 Gamma-Gamma 分布,推导出准确的 OP 闭合表达式。Balti 等^[14]研究了多个 CCI 影响下混合 RF/FSO 系统的性能,推导了 Meijer-G、单变量及多变量 Fox-H 函数的 OP、BER 和信道容量,并得出高信噪比下的渐进表达式。在此基础上,Sikri 等^[15]研究了多个 CCI 影响下的 RIS 辅助 RF/FSO 系统的性能,通过推导 OP 和 BER 新的闭合表达式评估所考虑系统的性能,仿真结果表明,即使存在 CCI,基于 RIS 的混合 RF/FSO 系统与传统混合 RF/FSO 系统相比性能也显著增强。上述文献介绍了微波波段的 RIS 技术,而光波段 RIS 的设计、制造和分析一直是纳米技术、材料科学和物理学学科中活跃的研究领域之一^[16-18]。光学 RIS 由亚波长的光学天线阵列组成,这些天线会与传入的电磁辐射发生光-物质的共振作用,从而控制光的振幅、相位和偏振^[19]。此外,与微波波段 RIS 部署类似,光学 RIS 可以反射入射光束,控制光束强度、相位、频率和极性,并根据用户的移动调制输出光束的方向^[20]。文献[21]提出一种光学 RIS 辅助

收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-05-30; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 重庆市教委科学技术项目(KJQN201901125)、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)、重庆理工大学研究生教育高质量发展行动计划(gzlcx20223041)

通信作者: *pxf@cqut.edu.cn

FSO链路的通信理论分析方法,描述了光学RIS的物理参数对端到端FSO信道质量的影响,但是该模型并没有考虑大气湍流的影响。在此基础上,Ndjiongue等^[22]研究了光学RIS辅助FSO系统的性能,并推导了系统的OP和BER,其中FSO链路满足指向误差和大气湍流联合影响下的Gamma-Gamma模型的要求。Yang等^[23]研究了多个光学RIS辅助FSO系统,FSO链路服从Gamma-Gamma分布,并根据力矩生成函数推导了OP、BER和信道容量的闭合表达式,仿真结果表明,随着光学RIS上元素数量的增加,系统的性能得以提升。然而,光学RIS在混构FSO/RF通信系统中的应用尚未得到深入研究。

为了解决FSO通信无法进行视距传输的问题,本文在FSO链路中引入RIS技术,并考虑RF信道由于频谱复用问题而受到多个CCI信号的影响,提出一种CCI影响下的RIS辅助FSO-RF混构系统方案。其中RIS辅助的FSO链路服从Gamma-Gamma衰落分布,

CCI影响下的RF链路服从Rayleigh衰落分布。另外,在中继节点处考虑使用译码转发协议,基于系统端到端瞬时信噪比的概率密度函数(PDF),得到了系统的OP和BER,并进一步推导了系统OP的渐进表达式,导出系统分集顺序。仿真结果表明,RIS辅助下的FSO-RF系统相较于不存在RIS的系统性能得到了提升。

2 系统与信道模型

CCI影响下基于RIS辅助的FSO-RF混合系统如图1所示。该系统包括一个源节点S、一个RIS、多个CCI、一个可将光信号转换为电信号的中继节点R和一个目的节点D。其中,源节点S与中继节点R之间无法进行视距通信,此时利用光学RIS使得源节点S将数据传输至中继节点R,R具有译码转发功能,其将数据传输到目的节点D,并且目的节点D周围存在多个CCI信号。

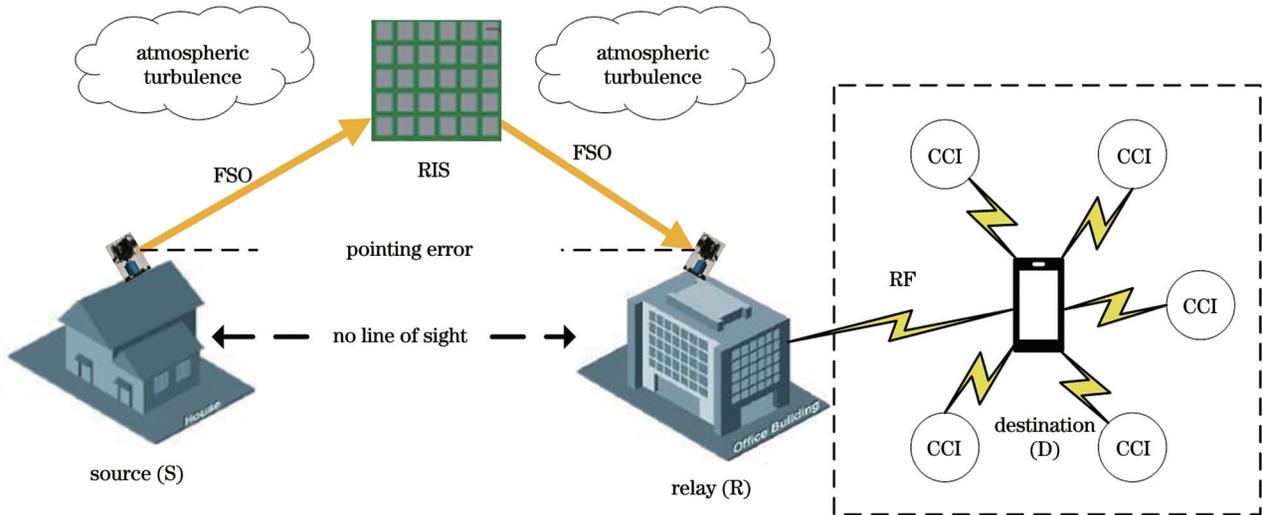


图1 RIS辅助FSO-RF混合系统模型

Fig. 1 RIS-assisted FSO-RF hybrid system model

2.1 RIS辅助FSO链路模型

第一阶段,即S-RIS、RIS-R通信阶段。中继节点R处的光探测器接收到的信号可以表示为

$$y_{SR} = \sqrt{P_{FSO}} h_1 h_2 \delta \exp(j\theta) x_1 + n_1, \quad (1)$$

式中: P_{FSO} 为FSO发射机的发射功率; h_1 和 h_2 分别为S-RIS和RIS-R的信道衰落增益; δ 为RIS反射单元的利用系数,这里近似取 $\delta = 1$; θ 为RIS上反射单元的可调相位; x_1 为数据传输符号; n_1 表示满足均值为0、方差为 N_1 的高斯白噪声。因此,R处的瞬时信噪比为

$$\gamma_{RIS-FSO} = \frac{|h_1 h_2 \delta \exp(j\theta)|^m}{N_1} P_{FSO}, \quad (2)$$

式中: $m = \begin{cases} 1, & \text{HD} \\ 2, & \text{IM/DD} \end{cases}$

通过调整RIS的相位,使得信道相位被消除,即

$\theta = 0$,得到的最大接收信噪比为

$$\gamma_{RIS-FSO} = \frac{|h_1 h_2|^m}{N_1} P_{FSO} \quad (3)$$

假设S到RIS和RIS到R两个通道具有相同的指向误差 I_a 、大气湍流 I_b 和大气路径损耗 I_c ,故有:

$$h_1 = I_a I_b I_c \quad (4)$$

首先,根据文献[24],得到指向误差 I_a 对应的PDF为

$$f_i(I_a) = \frac{\xi^2}{A_0^{\xi^2}} I_a^{\xi^2-1}, \quad 0 \leq I_a \leq A_0, \quad (5)$$

式中: A_0 为接收机孔径处采集光功率的分数, $A_0 = \text{erf}^2(v)$, $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数, $v = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{r}{\omega_b}$, r 为接收机的孔径半径, ω_b 为光束在传输距离 d 处的半径; ξ 为指向

误差系数, $\xi = \frac{\omega_e}{2\sigma_s}$, σ_s 为抖动标准差, ω_e 为等效光束半

$$\text{径}, \omega_e = \left[\frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v) \omega_b^2}{2v \exp(-v^2)} \right]^{1/2}.$$

然后, 根据文献[25], 大气湍流 I_b 被建模为广义 Gamma-Gamma 分布, 对应的 PDF 表示为

$$f_{I_b}(I_b) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_b^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} N_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_b}), \quad (6)$$

式中: $\alpha = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}$, $\beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}$ 分别为散射环境中的

大尺度参数和小尺度参数, $\sigma_R^2 = 1.23k^{7/6} C_n^2 d^{11/6}$ 为 Rytov 方差, C_n^2 为折射率结构参数, $k = 2\pi/\lambda$ 为光波数, λ 为激光波长, d 为激光传输距离; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; $N_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为第二类修正贝塞尔函数。

最后, 在给定天气和链路距离 L 不变的情况下, 大气路径损耗 $I_c = \exp(-\sigma L)$, 其中 σ 为路径损耗衰减系数。由于 $h_1 = I_a I_b I_c$, 因此 h_1 的 PDF 可以表示为

$$f_{h_1}(h_1) = \int_{\frac{h_1}{I_c A_0}}^{\infty} f_{I_b}(I_b) \frac{f_{I_a}\left(\frac{h_1}{I_b A_0}\right)}{I_b I_c} dI_b. \quad (7)$$

对上述积分进行联立求解, 最终得到闭合表达式:

$$f_{h_1}(h_1) = \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_1^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta h_1}{A_0 I_c} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right), \quad (8)$$

式中: $G_{p,q}^{m,n} \left(x \left| \begin{matrix} a_1, a_2, \dots, a_p \\ b_1, b_2, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right)$ 表示 Meijer-G 函数。因此, 平均信噪比可以表示为

$$\bar{\gamma}_{\text{RIS-FSO}} = \frac{P_{\text{FSO}}}{N} E(h_1 h_2)^m = \frac{P_{\text{FSO}}}{N} \left(\frac{A_0 I_c \xi^2}{\xi^2 + 1} \right)^{2m}, \quad (9)$$

式中: $E(\cdot)$ 表示期望。根据文献[26], $h_1 h_2$ 的 PDF 为

$$f_{h_1 h_2}(h_1 h_2) = S^2 (h_1 h_2)^{-1} G_{2,6}^{6,0} \left[\left(\frac{\alpha\beta}{A_0 I_c} \right)^2 h_1 h_2 \left| \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \right. \right], \quad (10)$$

式中: $X = \{\xi^2 + 1, \xi^2 + 1\}$; $Y = \{\xi^2, \alpha, \beta, \xi^2, \alpha, \beta\}$; $S = \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}$ 。利用随机变量变换, 信噪比 $\gamma_{\text{RIS-FSO}}$ 的 PDF 为

$$f_{\gamma_{\text{RIS-FSO}}}(y) = \frac{S^2}{m} y^{-1} G_{2,6}^{6,0} \left[\left(\frac{\alpha\beta \xi^2}{\xi^2 + 1} \right)^2 \left(\frac{y}{\bar{\gamma}_{\text{RIS-FSO}}} \right)^{\frac{1}{m}} \left| \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \right. \right]. \quad (11)$$

根据文献[27]中的式(07.34.21.0084.01)可以计算出

信噪比 $\gamma_{\text{RIS-FSO}}$ 的累计分布函数(CDF)为

$$F_{\gamma_{\text{RIS-FSO}}}(y) = \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{(2\pi)^{2(m-1)}} G_{2m+1, 6m+1}^{6m, 1} \left(Km^{-4m} y \left| \begin{matrix} 1, Q \\ P, P, 0 \end{matrix} \right. \right), \quad (12)$$

式中: $K = \left[\frac{\left(\frac{\alpha\beta \xi^2}{\xi^2 + 1} \right)^2}{\gamma_{\text{RIS-FSO}}^m} \right]^m$; $P = \frac{\xi^2}{m}, \dots, \frac{\xi^2 + m - 1}{m}$, $Q = \frac{\alpha}{m}, \dots, \frac{\alpha + m - 1}{m}, \frac{\beta}{m}, \dots, \frac{\beta + m - 1}{m}$; $\bar{\gamma}_{2,i} = \frac{\xi^2 + 1}{m}, \dots, \frac{\xi^2 + 1 + m - 1}{m}, \frac{\xi^2 + 1}{m}, \dots, \frac{\xi^2 + 1 + m - 1}{m}$ 。

2.2 RF 链路模型

第二阶段, 即 R-D 通信阶段。在 RF 链路中, 中继节点 R 通过光电转换装置将光信号转换为电信号, 通过 RF 信道传输到目的节点 D, 其中 D 周围存在 H 个 CCI, 用符号 $s_i (i = 1, 2, \dots, H)$ 表示, 平均功率为 P_s 。因此, D 处存在 CCI 情况下的接收信号可以表示为

$$y_{\text{RD}} = \sqrt{P_R} h_{\text{RD}} x_2 + \sqrt{P_s} \sum_{i=1}^H p_i s_i + n_2, \quad (13)$$

式中: P_R 为 R 的平均发射功率; h_{RD} 为 RF 链路的信道衰减系数; x_2 为数据传输符号; p_i 为第 i 个干扰源与 D 之间的信道衰减系数; n_2 表示满足均值为 0、方差为 N_2 的高斯白噪声。根据式(13), 在节点 D 处的瞬时信噪比为

$$\gamma_{\text{RF-CCI}} = \frac{P_R |h_{\text{RD}}|^2}{\sum_{i=1}^H P_s |p_i|^2 + N_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2 + 1}, \quad (14)$$

式中: $\gamma_1 = \bar{\gamma}_{\text{RD}} |h_{\text{RD}}|^2$, $\bar{\gamma}_{\text{RD}} = \frac{P_R}{N_2}$; $\gamma_2 = \sum_{i=1}^H \bar{\gamma}_{2,i} |p_i|^2$,

$\bar{\gamma}_{2,i} = \frac{P_s}{N_2}$ 。假定 RF 链路和 CCI-D 链路满足独立同分布的 Rayleigh 分布, 因此, RF 链路 γ_1 的 PDF 为

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_{\text{RD}}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_{\text{RD}}}\right). \quad (15)$$

进而可以求出 γ_1 的 CDF 为

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \int_0^\gamma f_{\gamma_1}(x) dx = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_{\text{RD}}}\right). \quad (16)$$

根据文献[15], γ_2 的 PDF 表示为

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{\Delta_j} \frac{\gamma^{i-1} D_{i,j}}{\Gamma(i) \bar{\gamma}_{2,j}^{-i}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{2,j}}\right), \quad (17)$$

式中: $\bar{\gamma}_{2,j}$ 为第 j 个干扰 D 链路的平均信噪比; $\sum_{j=1}^k \Delta_j = H$; $D_{i,j}$ 为文献[28]定义的系数。 $\gamma_{\text{RF-CCI}}$ 的 CDF 为

$$F_{\gamma_{\text{RF-CCI}}}(x) = \Pr\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2 + 1} \leq x\right) = \int_0^\infty F_{\gamma_1}[x(1+\gamma)] f_{\gamma_2}(\gamma) d\gamma = 1 - \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{\Delta_j} \frac{D_{i,j}}{\Gamma(i) \gamma_{2,j}^{-i}} (i-1)! \left(\frac{x}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{2,j}}\right)^{-i} \times \exp\left(-\frac{x}{\gamma_{\text{RD}}}\right). \quad (18)$$

3 系统性能分析

3.1 OP 分析

在所提系统中,根据 S-RIS、RIS-R 通信阶段和 R-D 通信阶段所得到的 CDF,并考虑在中继节点处使用译码转发协议,则系统端到端的 OP 表

示为

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

式中: γ_{th} 为阈值门限。将式(12)、(18)代入式(19),可以得到 OP 的封闭表达式为

$$P_{\text{out}} = 1 - \left[1 - \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{(2\pi)^{2(m-1)}} G_{2m+1, 6m+1}^{6m, 1} \left(Nm^{-4m} \gamma_{\text{th}} \middle| \begin{matrix} 1, Q \\ P, P, 0 \end{matrix}\right)\right] \times \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{\Delta_j} \frac{D_{i,j}}{\Gamma(i) \gamma_{2,j}^{-i}} (i-1)! \left(\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{2,j}}\right)^{-i} \times \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{RD}}}\right). \quad (20)$$

3.2 OP 渐进分析

为了进一步得到信道参数对系统性能的影响规律,以下将对系统 OP 进行渐进分析。当 $\bar{\gamma}_{\text{RD}} \rightarrow \infty$ 时,由式(20)可知,RF 链路的 OP 值趋于 0,因此系统的 OP 主要取决于 FSO 链路。OP 可以写成

$$P_{\text{out}} \approx \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{(2\pi)^{2(m-1)}} G_{2m+1, 6m+1}^{6m, 1} \left(Nm^{-4m} \gamma_{\text{th}} \middle| \begin{matrix} 1, Q \\ P, P, 0 \end{matrix}\right). \quad (21)$$

利用文献[27]中的式(07.34.06.0006.01),可将式(21)改写为

$$P_{\text{out}} \approx \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{(2\pi)^{2(m-1)}} \times \frac{\prod_{j=1, j \neq k}^{6m} \Gamma(b_j - b_k) \Gamma(1 - a_j + b_k)}{\prod_{j=2}^{2m+1} \Gamma(a_j - b_k) \Gamma(1 - b_{6m+1} + b_k)} (Nm^{-4m})^{b_k}, \quad (22)$$

式中: $a_j = \{1, Q\}$; $b_k = \{P, P, 0\}$ 。由于 $\bar{\gamma}_{\text{RIS-FSO}}$ 取较大值时,所考虑系统的多样性顺序由 $\bar{\gamma}_{\text{RIS-FSO}}$ 指数的最小值,即 b_k 的最小值决定。当 $\bar{\gamma}_{\text{RIS-FSO}} \rightarrow \infty$ 时,从式(22)导出的系统分集顺序为

$$P_{\text{RIS-FSO}} = \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \int_0^\infty \exp(-ax) x^{b-1} \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{(2\pi)^{2(m-1)}} G_{2m+1, 6m+1}^{6m, 1} \left(Nm^{-4m} x \middle| \begin{matrix} 1, Q \\ P, P, 0 \end{matrix}\right) dx = \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{2\Gamma(b) (2\pi)^{2m-1}} G_{2m+2, 6m+1}^{6m, 2} \times \left(\frac{Nm^{-4m}}{a} \middle| \begin{matrix} 1-b, 1, Q \\ P, P, 0 \end{matrix}\right). \quad (26)$$

对于 CCI-RF 链路,将式(18)代入式(25)得到其平均 BER:

$$d = - \lim_{\bar{\gamma}_{\text{RIS-FSO}} \rightarrow \infty} \frac{\log(P_{\text{out}})}{\log(\bar{\gamma}_{\text{RIS-FSO}})} = \min\left(\frac{\xi^2}{m}, \frac{\alpha}{m}, \frac{\beta}{m}\right), \quad (23)$$

因此系统的分集度主要受 ξ 、 m 、 α 和 β 的影响。

3.3 BER 分析

所考虑系统的 BER 为

$$P_{\text{BER}} = P_{\text{RIS-FSO}} + P_{\text{RF}} - 2P_{\text{RIS-FSO}} P_{\text{RF}}, \quad (24)$$

式中: $P_{\text{RIS-FSO}}$ 为 RIS 辅助 FSO 链路的平均 BER; P_{RF} 为 RF 链路的平均 BER。在该模型下, RIS-FSO 链路和 CCI-RF 链路均采用二进制调制方案,平均 BER^[29] 表示为

$$P = \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \int_0^\infty \exp(-ax) x^{b-1} F(x) dx. \quad (25)$$

a 和 b 的不同取值表示不同的二进制调制方式:当 $a=1$ 、 $b=0.5$ 时,调制方式为相干二进制相移键控(BPSK)调制;当 $a=1$ 、 $b=1$ 时,调制方式为差分二进制相移键控(DBPSK)调制;当 $a=0.5$ 、 $b=0.5$ 时,调制方式为相干二进制频移键控(BFSK)调制;当 $a=0.5$ 、 $b=1$ 时,调制方式为非相干二进制频移键控(NBFSK)调制;当 $a=0.25$ 、 $b=0.5$ 时,调制方式为开关键控(OOK)调制^[30]。

将式(12)代入式(25),根据文献[27]中的式(07.34.21.0088.01)得到 RIS-FSO 链路的平均 BER 为

$$P_{\text{RF}} = \frac{(b-1)!}{2\Gamma(b)} - \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{\Delta_j} \frac{D_{i,j}}{\Gamma(i) \gamma_{2,j}^{-i}} (i-1)! \times \int_0^{\infty} \exp\left[\left(-a + \frac{1}{\gamma_{\text{RD}}}\right)x\right] x^{b-1} \left(\frac{x}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{2,j}}\right)^{-i} dx. \quad (27)$$

对式(27)使用高斯-拉盖尔积分法,可近似得到 CCI-RF 链路的平均 BER:

$$P_{\text{RF}} \approx \frac{(b-1)!}{2\Gamma(b)} - \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{\Delta_j} \sum_{n=1}^{N_m} \frac{D_{i,j}}{\Gamma(i) \gamma_{2,j}^{-i}} (i-1)! \times \omega_n \exp\left[\left(1 - a + \frac{1}{\gamma_{\text{RD}}}\right)x_n\right] x_n^{b-1} \left(\frac{x_n}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{2,j}}\right)^{-i}, \quad (28)$$

式中: ω_n 为拉盖尔多项式权重因子; x_n 为拉盖尔多项式的第 n 个根。

将式(26)、(28)代入式(24),可以得到基于译码转发中继的系统近似平均 BER:

$$P_{\text{BER}} = \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{2\Gamma(b)(2\pi)^{2m-1}} G_{2m+2, 6m+1}^{6m, 2} \left(\frac{Nm^{-4m}}{a} \middle| \begin{matrix} 1-b, 1, Q \\ P, P, 0 \end{matrix} \right) + \frac{(b-1)!}{2\Gamma(b)} - \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{\Delta_j} \sum_{n=1}^{N_m} \frac{D_{i,j}}{\Gamma(i) \gamma_{2,j}^{-i}} (i-1)! \times \omega_n \exp\left[\left(1 - a + \frac{1}{\gamma_{\text{RD}}}\right)x_n\right] x_n^{b-1} \left(\frac{x_n}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{2,j}}\right)^{-i} - 2 \frac{S^2 m^{2(\alpha+\beta-2)}}{2\Gamma(b)(2\pi)^{2m-1}} G_{2m+2, 6m+1}^{6m, 2} \left(\frac{Nm^{-4m}}{a} \middle| \begin{matrix} 1-b, 1, Q \\ P, P, 0 \end{matrix} \right) \times \left\{ \frac{(b-1)!}{2\Gamma(b)} - \frac{a^b}{2\Gamma(b)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{\Delta_j} \sum_{n=1}^{N_m} \frac{D_{i,j}}{\Gamma(i) \gamma_{2,j}^{-i}} (i-1)! \times \omega_n \exp\left[\left(1 - a + \frac{1}{\gamma_{\text{RD}}}\right)x_n\right] x_n^{b-1} \left(\frac{x_n}{\gamma_{\text{RD}}} + \frac{1}{\gamma_{2,j}}\right)^{-i} \right\}. \quad (29)$$

4 仿真分析

为了验证所推导 OP 和平均 BER 的准确性,采用蒙特卡罗仿真方法进行对比分析,其迭代次数设置为 10^6 。分析了光检测方式、CCI 信号数量 H 和信噪比、大气湍流强度、指向误差系数及不同调制方式对系统 OP 和平均 BER 的影响。表 1 列出了具体的系统仿真参数,对于式(28)中的 N_m 值,在仿真时设置为 $N_m = 64$ 。

表 1 仿真参数配置

Table 1 Configuration of simulation parameters

Parameter	Value
FSO link wavelength	1550 nm
Optical link distance	1 km
Utilisation factor of RIS reflector unit	1
Receiver aperture radius	100 mm
γ_{th}	1 dB
Radius of the beam at the transmission direction	4.5 m
Jitter standard deviation	0.3

不同的 H 和 CCI 信号的信噪比对系统 OP 的影响如图 2 所示,其中 $\bar{\gamma}_{\text{SR}} = 40$ dB、 $m=1$ 、 $\gamma_{\text{th}} = 1$ dB。从图 2 可以观察到,随着 $\bar{\gamma}_{\text{RD}}$ 的增加,所考虑系统的 OP 降低。当 $\bar{\gamma}_{\text{RD}}$ 达到 80 dB 时,系统的 OP 处于饱和状态。这是因为在 $\bar{\gamma}_{\text{RD}}$ 取较大值的情况下,系统的 OP 由 FSO 链路主导,这也证实了式(22)得到的结果。当 $\bar{\gamma}_{\text{RD}}$ 为 40 dB 时,传统的 FSO/RF 系统的 OP 基本保持不变。此外,

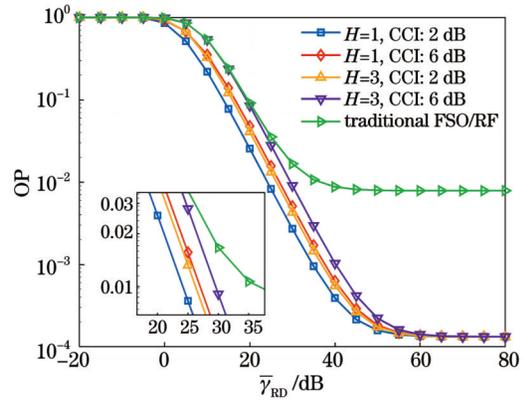


图 2 不同 H 和 CCI 信号的信噪比对应的系统 OP

Fig. 2 System OP corresponding to different H and signal-to-noise ratios of CCI signals

随着 H 和 CCI 信噪比的提高,即目的节点上的干扰信号数量及对应的信噪比增加时,系统的 OP 性能恶化。并且在相同参数($H=1$, CCI 为 6 dB)条件下, RIS 辅助系统 OP 可以达到 10^{-4} , 而传统的混合系统的 OP 只能达到 10^{-2} , 说明 CCI 下 RIS 辅助双跳混合 FSO-RF 系统的性能比传统的混合 FSO/RF 系统性能好得多。

仿真参数设置为 $\bar{\gamma}_{\text{RD}} = 50$ dB、 $m=1$ 、 $\gamma_{\text{th}} = 1$ dB、 $H=1$ 、CCI 为 2 dB 时,不同 ξ 对系统 OP 的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着 ξ 的增大(指向误差减小),系统的 OP 减小。在同等条件($\alpha=4$ 、 $\beta=1.9$ 、 $\xi=1.23$)下,与传统的 FSO/RF 混合系统相比, CCI 下 RIS 辅助双跳混合 FSO-RF 系统在 $\bar{\gamma}_{\text{SR}} = 40$ dB 时的 OP 可以达到 10^{-4} 量级,其性能更优。对于 RIS 辅助下的混合系统,当 ξ 从 1.23 减少到 0.73 时,系统的 OP 明

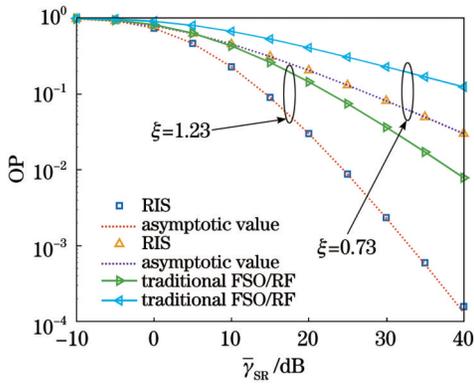


图 3 不同指向误差 ξ 对应的系统 OP

Fig. 3 System OP for different pointing error ξ

显上升,说明 ξ 是系统 OP 的主要影响因素,即式(23)是正确的。另外,系统 OP 的近似值与实际值基本相等,进一步说明了式(21)的准确性。

指向误差系数 $\xi = 1.23$ 时,不同湍流强度(强湍流: $\alpha = 4, \beta = 1.9$; 中湍流: $\alpha = 4.4, \beta = 2.5$; 弱湍流: $\alpha = 5, \beta = 3$)和光检测方式对系统 OP 的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着湍流强度的增大,系统的 OP 逐渐增大。在相同湍流强度下, $\bar{\gamma}_{SR} < 5$ dB 时, $m = 2$ 的 OP 更小,而 $\bar{\gamma}_{SR} > 5$ dB 时, $m = 1$ 的 OP 性能更好,说明不同的 m 也会使得系统 OP 发生变化。总体来说,相较于 $m = 2, m = 1$ 所带来的系统性能更优。在相同的湍流条件、不同的 m 值下,系统的 OP 变化非常明显,证明了式(23)中分集顺序表达式的准确性,即 $d = \min\left(\frac{\xi^2}{m}, \frac{\alpha}{m}, \frac{\beta}{m}\right)$, 此时 $\frac{\xi^2}{m} < \frac{\beta}{m} < \frac{\alpha}{m}$, 说明 ξ 和 m 是系统 OP 的主要影响因素。

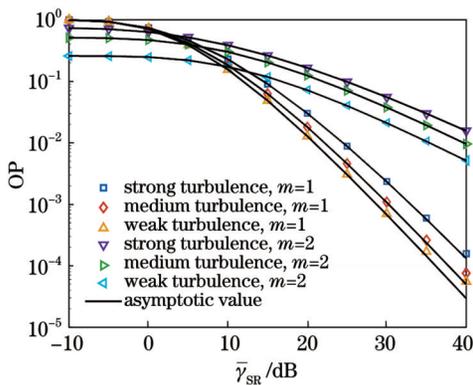


图 4 不同湍流强度和光检测方式对应的 OP

Fig. 4 OP corresponding to different turbulence intensities and light detection methods

图 5 中给出了固定 FSO 链路平均信噪比的情况下,5 种调制方式对系统平均 BER 的影响,参数设置为 $\bar{\gamma}_{SR} = 40$ dB、 $H = 2$ 、CCI 为 2 dB、 $m = 1, \alpha = 4, \beta = 1.9, \xi = 6.7$ 。可以看到, DBPSK 和 NBFSK 两种

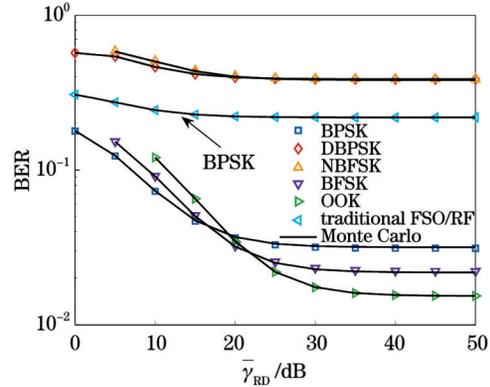


图 5 固定 FSO 链路平均信噪比时调制方式对系统 BER 的影响

Fig. 5 Effect of modulation methods on system BER for fixed FSO link average signal-to-noise ratio

调制方式效果接近,但 DBPSK 性能更好。在相同调制方式下,即都采用 BPSK,相较于传统的混合 FSO/RF 系统, RIS 辅助下的混构系统能显著降低系统的平均 BER。分析结果与仿真结果基本一致,证明了所推导公式的准确性。在这 5 种调制方式中,当 $\bar{\gamma}_{RD} < 20$ dB 时, BPSK 性能更优,而当 $\bar{\gamma}_{RD} > 20$ dB 时, OOK 性能更优。

图 6 给出了 RF 链路平均信噪比固定的情况下,5 种调制方式对系统平均 BER 的影响,具体参数为 $\bar{\gamma}_{RD} = 50$ dB、CCI 为 2 dB、 $m = 1, H = 1, \alpha = 4, \beta = 1.9, \xi = 1.23$ 。仿真结果表明,以平均 BER 为标准,在这 5 种调制方式中:当 $\bar{\gamma}_{SR} < 30$ dB 时, DBPSK > NBFSK > OOK > BFSK > BPSK, 即 DBPSK 是最优的调制方式;当 $\bar{\gamma}_{SR} > 30$ dB 时, NBFSK > DBPSK > OOK > BFSK > BPSK, 即 NBFSK 是最优的调制方式。相较于传统的 FSO/RF 系统,考虑强指向误差的影响,在高信噪比条件下,二者的 BER 曲线基本重合,但是对于低信噪比的情况, RIS 辅助的混合系统性能明显提升。

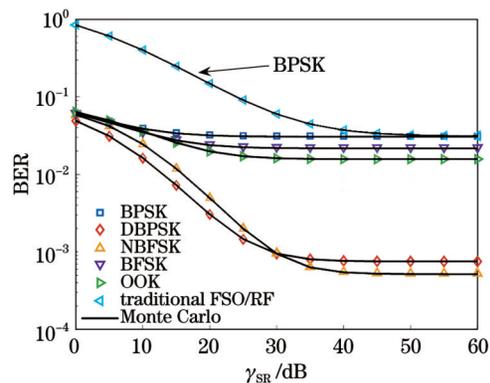


图 6 固定 RF 链路平均信噪比时调制方式对系统 BER 的影响

Fig. 6 Effect of modulation methods on system BER for fixed RF link average signal-to-noise ratio

5 结 论

对 CCI 下 RIS 辅助 FSO-RF 混构系统性能进行分析,其中 RIS 辅助下的 FSO 链路服从 Gamma-Gamma 分布,存在 CCI 的 RF 链路服从 Rayleigh 分布,中继节点处采用译码转发协议。推导了系统 OP 和 BER 的闭合表达式,提供了对 OP 的渐进分析,并通过蒙特卡罗仿真进行数值分析。仿真结果表明,在不同光检测方式中,HD 检测的效果优于 IM/DD 检测,并且该检测方式能有效对抗大气湍流对系统的影响。相较于传统的 FSO/RF 系统,在 RIS 的辅助下,即使存在 CCI,所提系统的性能也有较大提升。下一步打算对多个光学 RIS 辅助的 FSO-RF 混构系统进行分析,并考虑不同大气信道模型的系统性能。

参 考 文 献

- [1] Alimi I A, Muga N J. Simple and robust transmit diversity based free-space optical communications for 5G and beyond networks[J]. *Optics Communications*, 2020, 476: 126306.
- [2] Mowla M M, Ahmad I, Habibi D, et al. Green traffic backhauling in next generation wireless communication networks incorporating FSO/mmWave technologies[J]. *Computer Communications*, 2022, 182: 223-237.
- [3] Al-Ebraheemy O M S, Salhab A M, El-Absi M, et al. Performance analysis of mixed interference aligned MIMO RF/unified FSO DF relaying with heterodyne detection and two IMDD models[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 93297-93308.
- [4] 张韵, 王翔, 赵尚弘. 2×2 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 2×2 relay-assisted mixed radio frequency/free space optical airborne communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0301003.
- [5] 吴琰, 戴聪明, 赵凤美, 等. 基于 Málaga 湍流信道和 Nakagami 衰弱信道的选择合并混合 FSO/RF 系统的性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 0101002.
Wu Y, Dai C M, Zhao F M, et al. Performance analysis of selection combining hybrid FSO/RF system over Málaga turbulence channel and Nakagami fading channel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 0101002.
- [6] 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.
- [7] Boulogeorgos A A, Alexiou A. Performance analysis of reconfigurable intelligent surface-assisted wireless systems and comparison with relaying[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 94463-94483.
- [8] Wu Q Q, Zhang S W, Zheng B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [9] Yang L, Guo W, Ansari I S. Mixed dual-hop FSO-RF communication systems through reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(7): 1558-1562.
- [10] Li S, Yang L, da Costa D B, et al. On the performance of RIS-assisted dual-hop mixed RF-UWOC systems[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 340-353.
- [11] Padhan A K, Sahu H K, Sahu P R, et al. RIS assisted dual-hop mixed PLC/RF for smart grid applications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(11): 3523-3527.
- [12] Hweesa N L M, Zerek A R, Daeri A M, et al. Adjacent and co-channel interferences effect on AWGN and Rayleigh channels using 8-QAM modulation for data communication[C]//2020 20th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), December 20-22, 2020, Monastir, Tunisia. New York: IEEE Press, 2021: 321-327.
- [13] 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.
- [14] Balti E, Guizani M. Mixed RF/FSO cooperative relaying systems with co-channel interference[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 4014-4027.
- [15] Sikri A, Mathur A, Saxena P, et al. Reconfigurable intelligent surface for mixed FSO-RF systems with co-channel interference [J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(5): 1605-1609.
- [16] 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.
- [17] Nemati A, Wang Q A, Hong M H, et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(5): 180009.
- [18] Luo X G. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(4): 1804680.
- [19] Choudhury S M, Wang D, Chaudhuri K, et al. Material platforms for optical metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 959-987.
- [20] 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) [2023-05-30]. <https://arxiv.org/abs/2001.05715>.
- [21] Najafi M, Schober R. Intelligent reflecting surfaces for free space optical communications[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 9-13, 2019, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [22] Ndjiongue A R, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Performance analysis of RIS-based nT-FSO link over g-g turbulence with pointing errors[EB/OL]. (2021-02-06) [2023-05-30]. <https://arxiv.org/abs/2102.03654>.
- [23] Yang L, Guo W, da Costa D B D, et al. Free-space optical communication with reconfigurable intelligent surfaces[EB/OL]. (2020-11-17) [2023-05-30]. <https://arxiv.org/abs/2012.00547>.
- [24] 刘文亚, 王翔, 赵尚弘, 等. 同频干扰下混合 MUD-RF/FSO 航空中继通信系统性能分析[J]. *电子学报*, 2021, 49(10): 1960-1968.
Liu W Y, Wang X, Zhao S H, et al. Performance analysis of mixed MUD-RF/FSO airborne relay communication system with co-channel interference[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(10): 1960-1968.
- [25] Salhab A M, Yang L. Mixed RF/FSO relay networks: RIS-equipped RF source vs RIS-aided RF source[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(8): 1712-1716.
- [26] Singh D K, Tiwari B B. Performance Optimization of intelligent-reflecting-surfaces assisted-FSO link[EB/OL]. [2023-05-30]. <https://www.researchsquare.com/article/rs-2061792/v1>.
- [27] Wolfram Function Site. Meijer-G functions[EB/OL]. (2009-05-15) [2023-05-30]. <https://functions.wolfram.com/HypergeometricFunctions/MeijerG/>.
- [28] An K, Lin M, Ouyang J, et al. Symbol error analysis of hybrid satellite-terrestrial cooperative networks with cochannel interference[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(11):

- 1947-1950.
- [29] Torabi M, Effatpanahi R. Performance analysis of hybrid RF-FSO systems with amplify-and-forward selection relaying[J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 80-90.
- [30] Li S, Yang L, Zhang J Y, et al. Mixed THz/FSO relaying systems: statistical analysis and performance evaluation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(12): 10996-11010.

Performance Analysis of RIS-Assisted FSO-RF Hybrid Systems Under Co-Channel Interference

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

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

Abstract

Objective The problems of spectrum limitations and co-channel interference (CCI) in radio frequency (RF) communication systems have limited the development of high-speed rate services. At the same time, free-space optical (FSO) communication is complementary to RF communication because it does not require a spectrum license and is highly resistant to interference. However, FSO communication is susceptible to atmospheric turbulence and pointing errors, which can deteriorate the communication link and even cause disruptions. In order to improve the performance of FSO systems, traditional solutions use spatial diversity, aperture averaging, and FSO-RF hybrid systems. Based on the FSO-RF hybrid system, we introduce reconfigurable intelligent surface technology in the FSO link to solve the problem of FSO being unable to carry out line-of-sight communication. Considering the CCI problem in the RF link, we propose a reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted FSO-RF hybrid system scheme under CCI, which further improves the performance of the system compared with the traditional FSO/RF scheme.

Methods We present a scheme for a hybrid FSO-RF system under CCI. Firstly, reconfigurable smart surface techniques are introduced in the FSO link for the case where line-of-sight transmission is not possible for FSO communication, and CCI signals in the RF link are considered. The FSO link obeys the Gamma-Gamma distribution, and the RF link obeys the Rayleigh distribution. In addition, a decode-and-forward protocol is used at the optoelectronic switching relay node. Then, based on the probability density function of the system end-to-end instantaneous signal-to-noise ratio (SNR), closed-form expressions for the system outage probability and average bit error rate (BER) are derived, and Monte Carlo simulation is used to verify the accuracy of the results. Finally, the corresponding conclusions are drawn based on the diversity order of the system.

Results and Discussions With a fixed average SNR of the FSO link, the outage probability performance of the system deteriorates as the H and CCI SNR increase, *i.e.* when the number of interfering signals at the destination node and the corresponding SNR increase. Moreover, under the same parameter conditions, the RIS-assisted system can achieve an outage probability of 10^{-4} , while the conventional hybrid system can only achieve an outage probability of 10^{-2} , indicating that the performance of the RIS-assisted two-hop hybrid FSO-RF system under CCI is much better than that of the traditional FSO/RF system (Fig. 2). The performance of the proposed FSO-RF hybrid system is better than that of the traditional FSO/RF hybrid system under the same parameters with fixed average SNR of the RF link and for different pointing error coefficients on the outage probability of the system. For the RIS-assisted hybrid system, when the pointing error coefficient is reduced from 1.23 to 0.73, the outage probability of the system increases significantly, indicating that the pointing error coefficient is the dominant factor affecting the outage probability of the system (Fig. 3). The effect of five modulation methods on the average BER of the system is analyzed for a fixed FSO link average SNR. The two modulation methods, differential binary phase shift keying (DBPSK) and noncoherent binary frequency shift keying (NBFSK), are close in effect, but DBPSK performs better. The RIS-assisted hybrid system can significantly reduce the average BER compared with the traditional FSO/RF system with the same modulation, *i.e.* both using BPSK. The results are consistent with the simulation results, indicating the accuracy of the obtained formulae (Fig. 5). The effect of the five modulation methods on the average BER of the system is analyzed for a fixed RF link average SNR, with low BER. $\text{DBPSK} > \text{NBFSK} > \text{OOK} > \text{BFSK} > \text{BPSK}$ when $\bar{\gamma}_{\text{SR}}$ is less than 30 dB. $\text{NBFSK} > \text{DBPSK} > \text{OOK} > \text{BFSK} > \text{BPSK}$ when $\bar{\gamma}_{\text{SR}}$ is higher than 30 dB. In comparison with the traditional FSO/RF system, the two BERs can largely coincide under high SNR

conditions considering the effect of strong pointing errors, but for low SNR conditions, the performance of the RIS-assisted hybrid system is significantly improved (Fig. 6).

Conclusions In this paper, the performance of RIS-assisted FSO-RF hybrid systems under CCI is investigated. The FSO link under RIS assistance obeys the Gamma-Gamma distribution, and the RF link in the presence of CCI obeys the Rayleigh distribution. The decode-and-forward protocol is used at the relay node, and closed-form expressions for the system outage probability and the average BER are derived. In addition, to obtain more significant conclusions, an asymptotic analysis of the outage probability is also provided in this paper, and Monte Carlo simulations are performed to analyze them numerically. The simulation results show that HD detection outperforms IM/DD detection among the different light detection methods and that this detection method is effective in combating the effects of atmospheric turbulence on the system. Compared with the traditional FSO/RF system, the performance of the proposed system solution in this paper is greatly improved with the assistance of RIS, even in the presence of CCI.

Key words fiber optics; reconfigurable intelligent surfaces; co-channel interference; outage probability; average bit error rate; decode-and-forward protocols