

FSO-UWOC混合双跳系统中断概率性能分析

周宇,李岳衡*,王炜杰,吕勇,居美艳

(河海大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213200)

摘要:针对现有研究在跨介质“空-地-海”中继通信领域信道建模不完善的问题,分析了解码转发(DF)中继下自由空间光通信(FSO)-水下无线光通信(UWOC)混合双跳系统的中断概率性能。通过构建包含Gamma-Gamma大气湍流、广义伽马(GGD)水下湍流、指向误差和路径损耗的复合信道模型,利用Meijer-G函数推导了系统中断概率的闭型表达式及高信噪比渐近解。仿真结果表明:大气湍流增强使中断概率显著上升,且指向误差的影响比湍流效应更明显;增大FSO链路距离会持续恶化性能,而UWOC链路距离的影响在高信噪比时减弱;外差检测性能始终优于强度调制/直接检测(IM/DD)。理论与仿真结果高度吻合,验证了所提模型的正确性。

关键词:解码转发;自由空间光;水下无线光通信;指向误差;湍流衰落;性能分析

中图分类号:TN929.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0030-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.006

Outage probability performance analysis of
FSO-UWOC hybrid dual-hop system

ZHOU Yu, LI Yueheng*, WANG Weijie, LYU Yong, JU Meiyan

(College of Information Science and Engineering, Hohai University, Changzhou Jiangsu 213200, China)

Abstract: To address the issue of incomplete channel modeling in existing studies on cross-medium "air-ground-sea" relay communications, this paper analyzes the outage probability performance analysis of a hybrid dual-hop free space optical(FSO)-underwater wireless optical communication(UWOC) system under decode-and-forward(DF) relaying. By constructing composite channel models incorporating Gamma-Gamma atmospheric turbulence, generalized Gamma(GGD) underwater turbulence, pointing errors, and path loss, closed-form expressions for the system outage probability and its high-signal-to-noise ratio asymptotic solutions are derived using Meijer-G functions. Simulation results demonstrate that intensified atmospheric turbulence significantly increases the outage probability, with pointing errors exhibiting a more pronounced impact than turbulence effects. Increasing the FSO link distance consistently degrades performance, whereas the influence of the UWOC link distance diminishes at high SNR. Heterodyne detection consistently outperforms intensity modulation/direct detection(IM/DD). The theoretical results show strong agreement with simulations, validating the correctness of the proposed model.

Key words: decode-and-forward, free space optical, underwater wireless optical communication, pointing error, turbulence fading, performance analysis

0 引言

可见光通信作为第六代/超第六代移动通信技术

收稿日期:2025-01-14。

作者简介:周宇(2000—),女,硕士,就读于河海大学信息科学与工程学院电子科学与技术专业,主要研究方向为水下无线光通信,在校期间获优秀研究生、校一等奖学金与校二等奖学金。

***通信作者:**李岳衡(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为水下无线光通信。中国电子学会、中国计算机学会和日本电子信息与通信协会(IEICE)高级会员。



(6G/B6G)“空-天-地-海”一体化覆盖的关键技术之一,其水下可见光通信(UWOC)应用在高速、低延迟传输方面潜力显著^[1-2],然而现有研究多集中于同质介质中继传输,对跨介质“空/天-地-海”中继通信的探索仍较为缺乏^[3-4]。在空/地-海跨介质中继通信领域,现有研究已取得一定进展。例如,文献[5]提出了基于可重构智能表面(RIS)的双跳RF-UWOC系统,分析了放大-转发(AF)与解码-转发(DF)2种中继协议下的中断概率、误码率及遍历容量。文献[6]研究了同类系统的性能,并优化了无人机高度。文献[7]则针对AF中

继下的系统性能进行了分析。然而,射频(RF)通信存在易受同频干扰、信道衰落显著,且有限的频谱资源难以满足高速数据传输需求等局限。尤其在与高速水下光链路协同工作时,常需借助缓存单元暂存数据,这限制了系统的实际应用灵活性。

相较于RF通信,自由空间光通信(FSO)在容量、速率和安全性上优势显著,是更具潜力的空/地-水面中继链路^[8]。基于此,一系列研究聚焦于FSO-UWOC双跳系统:文献[9]分析了AF机制下系统性能,但其模型未包含路径损耗。文献[10]研究了RIS辅助的系统,但UWOC链路仅考虑对数正态湍流,忽略了指向误差与路径损耗。文献[11]为FSO和UWOC链路分别采用了Fischer-Snedecor和混合指数广义伽马(EGG)湍流模型,但同样未考虑指向误差与路径损耗。事实上,可靠的建模需基于已验证的模型。对于FSO链路,Gamma-Gamma与Lognormal分布分别是模拟中、强、弱大气湍流的有效模型^[12];对于UWOC链路,广义伽马(GGD)与EGG模型则被证实能出色拟合海洋湍流^[13-15]。在路径损耗方面,Elamassie模型也被证明比传统指数模型更能准确描述水下光传输的路径损失^[16]。

现有关于FSO-UWOC混合系统的研究在信道建模上存在不足,往往未能同时综合考虑湍流、指向误差与路径损耗等关键衰落因素。为此,本文构建一个FSO-UWOC混合双跳系统模型,分析采用DF中继协议的FSO-UWOC混合双跳系统的中断性能。

1 系统与信道模型

1.1 系统概述

本文构建的FSO-UWOC混合双跳系统模型如图1所示。系统包含3个节点:发射节点S、海面中继节点R和水下目的节点D。信号传输具体过程如下:节点S通过FSO链路将信号发送至节点R;节点R对信号执

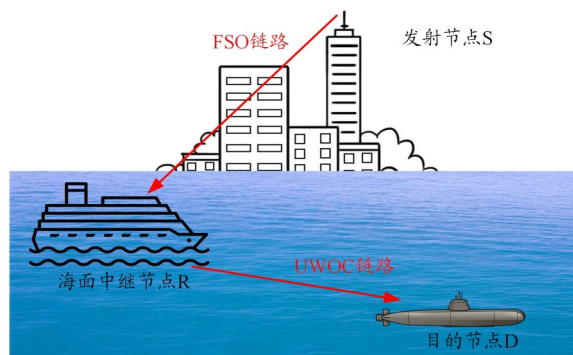


图1 FSO-UWOC混合双跳传输系统模型

行DF操作;重构后的信号再经UWOC链路传输至节点D。为精确评估系统性能,在信道建模中,本文对FSO与UWOC这2条链路的信道模型进行了精细化的构建,将路径损耗、湍流衰落和指向误差三者结合,构建一个复合衰落信道模型。

1.2 FSO链路复合模型与瞬时SNR统计特性

本文采用复合衰落模型对S-R的FSO链路的信道建模。该模型由大气路径损耗 h_{ll} 、Gamma-Gamma湍流效应 h_a 和零视轴指向误差 h_{pa} 构成,旨在精确模拟光信号在大气信道中传输的真实物理过程。研究表明^[12,17],大气路径损耗 h_{ll} 可以准确地由Beers-Lambert定律这一单指数衰减模型进行表征,其表达式为 $h_{ll} = e^{-\sigma Z}$,其中 σ 是大气衰减系数,其值由大气状况决定; Z 是FSO链路的传输距离。大气湍流效应 h_a 采用Gamma-Gamma分布来模拟中强湍流条件,其概率

密度函数(PDF)表达式为 $f(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \times$

$K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}h_a)$,其中 α 和 β 是分布的形状参数, a 为GGD的另一个形状参数, $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数, $K_{\alpha-\beta}$ 表示阶数为 $\alpha-\beta$ 的第二类修正贝塞尔函数。零视轴指向误差 h_{pa} ^[18]的PDF表达式为 $f(h_{pa}) = \frac{\xi_1^2}{A_0^{\xi_1}} h_{pa}^{\xi_1-1} (0 \leq h_{pa} \leq A_0)$,其中 A_0 为光束无抖动时在接收机处的最大接收光强; ξ_1 为等效光束半径与指向误差位移标准差的比值, ξ_1 值越小,表示指向误差越严重。

本文根据随机变量函数值的PDF计算准则^[19],通过特定公式^[19-20]进行计算,得到FSO链路含零视轴指向误差下复合衰落信道 h_1 的PDF表达式为

$$f(h_1) = \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)h_1} G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta h_1}{A_0 h_{ll}} \left| \begin{matrix} 1 + \xi_1^2 \\ \xi_1^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right] \quad (1)$$

其中, $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ 为Meijer-G函数^[21]。

假设S-R链路的接收信号 $y_{SR} = \sqrt{P_1} h_1 s + n_1$ 。其中, $h_1 = h_a h_{pa} h_{ll}$, P_1 为节点S的发射功率, s 为发送的平均能量为1的二进制调制符号; n_1 为Gauss随机变量,其均值为0,方差为 σ_1^2 。

1)在外差检测时^[22],S-R链路瞬时接收SNR为 $\gamma_1 = \frac{\sqrt{P_1} h_1}{\sigma_1^2}$,平均SNR为 $\mu_{\text{heterodyne}} = \sqrt{P_1} \frac{E[h_1]}{\sigma_1^2}$,记 $\eta_1 = \xi_1^2/(1 + \xi_1^2)$,则推导出瞬时SNR γ 的PDF表达式为

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = f(h_1) \left|_{h_1 = \frac{A_0 h_{ll} \eta_1 \gamma}{\mu_{\text{heterodyne}}}} \right| \frac{\partial h_1}{\partial \gamma} =$$

$$\frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma} G_{1,3}^{3,0} \left[\eta_1 \alpha \beta \frac{\gamma}{\mu_{\text{heterodyne}}} \middle| \frac{1 + \xi_1^2}{\xi_1^2, \alpha, \beta} \right] \quad (2)$$

2)在强度调制/直接检测(IM/DD)时^[22], S-R链路瞬时接收 SNR 为 $\gamma_1 = \frac{P_1 h_1^2}{\sigma_1^2}$, 平均 SNR 为 $\mu_{\text{IM/DD}} = \frac{P_1 E^2[h_1]}{\sigma_1^2} = \frac{P_1 h_{11}^2 A_0^2 \xi_1^4}{(1 + \xi_1^2)^2 \sigma_1^2}$, 记 $\eta_1 = \xi_1^2/(1 + \xi_1^2)$, 则瞬时 SNR 的 PDF 表达式为

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = f(h_1) \left|_{h_1 = \frac{A_0 h_{11} \eta_1 \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\mu_{\text{IM/DD}}}}} \right| \frac{\partial h_1}{\partial \gamma} = \frac{\xi_1^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma} G_{1,3}^{3,0} \left[\eta_1 \alpha \beta \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_{\text{IM/DD}}}} \middle| \frac{1 + \xi_1^2}{\xi_1^2, \alpha, \beta} \right] \quad (3)$$

综合1)和2)的结论,给出的统一 PDF 表达式为

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = \frac{\xi_1^2}{r\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma} G_{1,3}^{3,0} \left[\eta_1 \alpha \beta \left(\frac{\gamma}{\mu_r} \right)^{\frac{1}{r}} \middle| \frac{1 + \xi_1^2}{\xi_1^2, \alpha, \beta} \right] \quad (4)$$

其中, r 为与检测方法有关的关键参数, $r = 1$ 代表接收机采用外差检测方案, $r = 2$ 代表接收机采用 IM/DD 检测方案。为了与参数 r 匹配, 平均 SNR 也相应地定义为 $\mu_1 = \mu_{\text{heterodyne}}, \mu_2 = \mu_{\text{IM/DD}}$

将式(4)代入 γ_1 的累积分布函数(CDF), 定义 $F_{\gamma_1}(\gamma) = \int_0^\gamma f_{\gamma_1}(x) dx$, 可以得出 FSO 链路含路径损耗、零视轴指向误差与大气湍流复合衰落信道 h_1 下瞬时 SNR γ_1 的 CDF 的闭型表达式为

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\eta_1 \alpha \beta \left(\frac{\gamma}{\mu_r} \right)^{\frac{1}{r}} \middle| \frac{1 + \xi_1^2}{\xi_1^2, \alpha, \beta, 0} \right] \quad (5)$$

1.3 UWOC 链路复合模型与瞬时 SNR 统计特性

本文同样采用了精细化的复合衰落模型对 R-D 的 UWOC 链路信道建模。R-D 链路的总体瞬时信道衰落系数 $h_2 = h_f h_{p0} h_{l2}$, 其中海洋湍流衰落 h_f ^[13] 的 PDF

表达式为 $f_{h_f}(h_f) = \frac{ch_f^{ac-1}}{b^{ac}} \times \frac{\exp\left(-\left(h_f/b\right)^c\right)}{\Gamma(a)}$, $h_f > 0$, 根

据文献[23]的方法, 通过预先设定闪烁指数 σ_f^2 并固定形状参数 c 的取值, 以有效地达到仿真的预期目标。 h_{p0} 为零视轴指向误差; b 为尺度参数, h_{l2} 表示 UWOC 链路路径损耗^[16]。UWOC 链路的路径损耗远复杂于大气, 需同时考虑海水的吸收/散射效应和几何损耗, 因此本文采用被证实更精确的 Elamassie 闭型公式, 即

$h_{l2} = \left(\frac{D_R}{\theta d} \right)^2 e^{-c_0 d \left(\frac{D_R}{\theta d} \right)^r}$ 。其中, d 为 UWOC 链路的传输距离, θ 为 UWOC 中激光光束的全宽发散角, D_R 为接收机孔径直径。该模型能更准确地描述光脉冲在水下的扩展和衰减, 比简单的指数模型更具优势。与式(1)的证明过程相似, 通过利用特定公式^[20]进行变形与处理, 得到 UWOC 链路复合衰落信道 h_2 的 PDF 表达式为

$$f(h_2) = \frac{\xi_2^2}{h_2 \Gamma(a)} G_{1,2}^{2,0} \left[\left(\frac{h_2}{bA_0 h_{l2}} \right)^c \middle| \frac{c + \xi_2^2}{c}, a \right] \quad (6)$$

其中, 形状参数 c 值取整数(非整数时可以四舍五入近似为整)。

本文基于上述推导得到的复合衰落信道系数 h_2 的 PDF, 以系统推导 UWOC 链路瞬时接收 SNR γ_2 的 PDF。

假设采用 DF 中继协议的 R-D 链路中目的节点 D 处的电流接收信号的表达式为 $y_{\text{RD}} = \eta \sqrt{P_2} h_2 \hat{s} + n_2$, 其中 η 为 UWOC 链路的光/电转换系数, $\hat{s}$ 为节点 R 的对应二进制调制解码重构信号, P_2 为链路发射功率。

1)在外差检测时, UWOC 链路的瞬时接收 SNR 为 $\gamma_2 = \eta \sqrt{P_2} h_2 / \sigma_2^2$, 平均 SNR 为 $\rho_{\text{heterodyne}} = \eta \sqrt{P_2} / \sigma_2^2$ 。显然有 $h_2 = \gamma_2 / \rho_{\text{heterodyne}}$, 则瞬时接收 SNR γ_2 的 PDF 为

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{\xi_2^2}{\Gamma(a)\gamma} G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma}{h_{l2} \rho_{\text{heterodyne}}} \right)^c \middle| \frac{c + \xi_2^2}{c}, a \right] \quad (7)$$

2)在 IM/DD 检测时, UWOC 链路瞬时接收 SNR 为 $\gamma_2 = \eta^2 P_2 h_2^2 / \sigma_2^2$, 平均 SNR 为 $\rho_{\text{IM/DD}} = \eta^2 P_2 \sigma_2^2$; 因而有 $h_2 = \sqrt{\gamma_2 / \rho_{\text{IM/DD}}}$, 据此得瞬时接收 SNR γ_2 的 PDF 为

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{\xi_2^2}{2\Gamma(a)\gamma} G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma}{h_{l2}^2 \rho_{\text{IM/DD}}} \right)^{\frac{c}{2}} \middle| \frac{c + \xi_2^2}{c}, a \right] \quad (8)$$

综合上述1)和2)的推导结果, 得到有关 γ_2 PDF 的统一表达式为

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{\xi_2^2}{r\Gamma(a)\gamma} G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma}{\rho_r} \right)^{\frac{c}{r}} \middle| \frac{c + \xi_2^2}{c}, a \right] \quad (9)$$

其中, 外差检测时 $r = 1$, IM/DD 时 $r = 2$; $\rho_1 = h_{l2} \rho_{\text{heterodyne}}$, $\rho_2 = h_{l2}^2 \rho_{\text{IM/DD}}$

同样地, 与式(5)类似, 得到 UWOC 链路瞬时 SNR

γ_2 的CDF闭型表达式为

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{\xi_2^2}{c\Gamma(a)} G_{2,3}^{2,1} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma}{\rho_r} \right)^{\frac{c}{2}} \left| \begin{matrix} 1, \frac{\xi_2^2}{c} + 1 \\ \frac{\xi_2^2}{c}, a, 0 \end{matrix} \right. \right] \quad (10)$$

2 端到端系统性能分析

2.1 端到端瞬时SNR的统计特性

针对采用DF中继传输方案的FSO-UWOC混合双跳传输系统,由于中继节点R处需要对源节点S的信号进行解码再重构新的发射信号,故而FSO链路和UWOC具有独立性,任一链路的性能恶化都可能导致整个双跳系统的崩溃。因此,目标节点D的混合双跳系统端到端等效瞬时SNR γ^{DF} 可以表示为S-R链路与R-S链路瞬时SNR二者间的最小值^[24],即

$$\gamma^{\text{DF}} = \min(\gamma_1, \gamma_2) \quad (11)$$

对于DF中继协议, γ^{DF} 的CDF可以写成

$$F_{\gamma^{\text{DF}}}(\gamma) = F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) \quad (12)$$

将式(5)、式(10)代入式(12),即可得到 γ^{DF} CDF的具体闭型表达。

对式(12)作关于变量 γ 的一阶求导运算,可得FSO-UWOC混合双跳链路端到端SNR的PDF表达式为

$$f_{\gamma^{\text{DF}}}(\gamma) = f_{\gamma_1}(\gamma) + f_{\gamma_2}(\gamma) - f_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)f_{\gamma_2}(\gamma) \quad (13)$$

将式(4)、式(5)、式(9)、式(10)代入式(13)即可得到 γ^{DF} 的具体PDF闭型表达式。

2.2 中断概率及渐近值分析

当端到端链路的信噪比 γ 低于某给定的阈值 γ_{th} 时,系统传输中断,计算此事件的概率即为系统中断概率^[25]。FSO-UWOC混合双跳传输系统的中断概率为

$$P_{\text{out}} = F_{\gamma^{\text{DF}}}(\gamma_{\text{th}}) \quad (14)$$

为进行渐近分析,令FSO和UWOC这2条链路的平均SNR $\mu_r = \rho_r = \bar{\gamma} \rightarrow \infty$,有 $\frac{\gamma}{\mu_r} = \frac{\gamma}{\rho_r} \rightarrow 0$,其中 ρ_r 为UWOC链路的平均SNR。由式(12)得FSO-UWOC混合双跳系统的中断概率渐近表示为

$$P_{\text{out}}^{\infty} = F_{\gamma^{\text{DF}}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) \approx F_{\gamma_1}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) + F_{\gamma_2}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) \quad (15)$$

其中, $F_{\gamma_1}^{\infty}(\gamma_{\text{th}})$ 和 $F_{\gamma_2}^{\infty}(\gamma_{\text{th}})$ 分别代表 $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ 时 $F_{\gamma_1}(\gamma_{\text{th}})$ 和 $F_{\gamma_2}(\gamma_{\text{th}})$ 的渐近值。本文将 $F_{\gamma_1}(\gamma_{\text{th}})$ 、 $F_{\gamma_2}(\gamma_{\text{th}})$ 通过特定公式^[26]进行计算,得到 $F_{\gamma^{\text{DF}}}(\gamma_{\text{th}})$ 可渐近表示为

$$F_{\gamma^{\text{DF}}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) \rightarrow \frac{\Delta_1 \gamma_{\text{th}}^{\frac{\xi_1^2}{2}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\xi_1^2}{2}}} + \frac{\Delta_2 \gamma_{\text{th}}^{\frac{\alpha}{2}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\alpha}{2}}} + \frac{\Delta_3 \gamma_{\text{th}}^{\frac{\beta}{2}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\beta}{2}}} + \frac{\Delta_4 \gamma_{\text{th}}^{\frac{\xi_2^2}{2}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\xi_2^2}{2}}} + \frac{\Delta_5 \gamma_{\text{th}}^{\frac{ac}{2}}}{\bar{\gamma}^{\frac{ac}{2}}} \quad (16)$$

其中, Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、 Δ_4 、 Δ_5 均为常数。

3 仿真结果与分析

本文采用蒙特卡洛(MC)仿真验证上述理论分析结果的准确性并考察核心参数选择对系统中断概率性能的影响。水下仿真环境采用常见的近海海岸水质,其消光系数 $c_0 = 0.305 \text{ m}^{-1[16]}$;又假设两跳链路的平均SNR相等,即满足 $\mu_r = \rho_r = \bar{\gamma}$,门限噪声 $\gamma_{\text{th}} = 2 \text{ dB}$ 。系统仿真主要参数^[13-14,16-18,27]如表1所示。

表1 FSO-UWOC系统性能仿真主要参数

参数	数值
Rytov方差 σ_R^2	0.6/2
大气衰减系数 σ	1/1 000
大气传输距离Z/m	200、500
全宽波束发散角 $\theta_{1/c}/(^{\circ})$	6
修正系数T	0.13
接收机孔径直径 D_R/cm	5
水下传输距离d/m	20、30
抖动离差 σ_s/cm	10、20
接收机半径 r_a/cm	20、30
光束宽度 w_z/cm	40、20
海洋湍流闪烁指数 σ_f^2	0.107 4、0.206 6、0.454 8
GGD形状参数c	3

混合FSO-UWOC中继通信系统在不同检测方案下的中断概率性能,如图2所示。研究设置了2种典型的大气湍流场景:弱湍流工况(Rytov方差 $\sigma_R^2 = 0.6$,对应Gamma-Gamma分布参数 $\alpha=5.41$ 、 $\beta=3.78$,表征大气湍流较弱的传输环境)和强湍流工况(Rytov方差 $\sigma_R^2 = 2$,对应Gamma-Gamma分布参数 $\alpha=3.99$ 、 $\beta=1.70$,模拟强湍流干扰下的信道特性)。

系统关键参数配置如下:FSO链路(第一跳)采用强指向误差模型,具体参数为抖动离差 $\sigma_s = 20 \text{ cm}$ 、接收机孔径半径 $r_a = 20 \text{ cm}$ 、发射光束宽度 $w_z = 40 \text{ cm}$,由此计算得到综合指向误差系数 $\xi_1 = 1.14$,传输距离 $Z = 200 \text{ m}$ (典型近地面大气信道);UWOC链路(第二跳)采用弱指向误差配置,参数包括抖动离差 $\sigma_s = 10 \text{ cm}$ 、接收机孔径半径 $r_a = 30 \text{ cm}$ 、光束宽度 $w_z = 20 \text{ cm}$,对应指向误差系数 $\xi_2 = 4.0$,水下传输距离 $d = 20 \text{ m}$ (近岸浅海通信

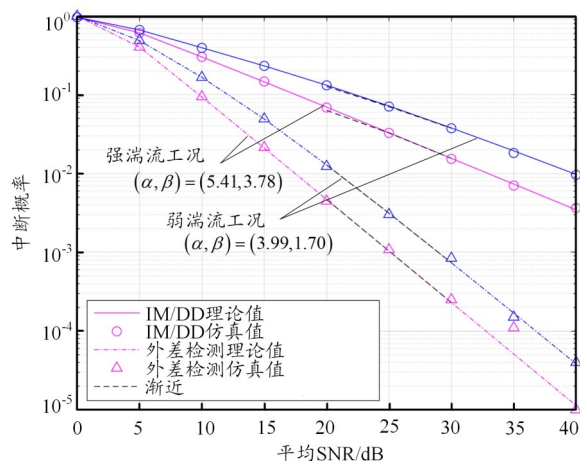


图2 混合FSO-UWOC系统在不同检测方案下的中断概率性能

场景);海洋湍流闪烁指数设置为 $\sigma_I^2=0.1074$ (中等强度湍流环境)。

由图2可知,在UWOC链路参数(如水下传输距离、海洋湍流强度和指向误差)固定的条件下,FSO-UWOC混合双跳系统的中断概率性能呈现以下规律:不论系统采用IM/DD检测还是外差检测接收方案,都将会因FSO链路中大气湍流强度的增强而导致中断概率性能的快速下降,这说明大气湍流强度对中断概率性能影响严重;在相同平均SNR $\bar{\gamma}$ 的条件下,外差检测(相干检测)的系统中断概率值始终低于非相干的IM/DD检测,体现了外差检测的性能优势。此外,系统理论计算值与MC仿真值高度吻合,且在高SNR区域,中断概率渐近值与对应SNR下的理论值基本重合。这一致性充分验证了本文关于系统中断概率理论值及其渐近值闭型公式推导的正确性。

在接收机检测技术固定为IM/DD的前提下,第一跳FSO链路不同指向误差($\xi_1 = 1.14$ 和 $\xi_1 = 1.52$)对系统中断概率的影响如图3所示。根据指向误差的定义式 $\xi_1^2 = w_z^2/4\sigma_s^2$ 可知, ξ_1 值越小,表示指向误差越严重。由图3可知,在相同大气湍流环境下, ξ_1 越小(指向误差越严重),系统中断概率性能越差。当大气湍流强度变化时(Rytov方差 σ_R^2 从0.6增至2), $\xi_1 = 1.52$ 对应的中断概率曲线间的差异,明显大于 $\xi_1 = 1.14$ 对应的曲线差异。这说明对于FSO链路,指向误差对系统中断概率的影响比大气湍流效应更为显著。高SNR条件下,渐近曲线与中断概率理论曲线吻合良好,验证了渐近线理论推导结果的正确性。

在特定湍流条件下(大气湍流Rytov方差 $\sigma_R^2 = 2$,海洋湍流闪烁指数 $\sigma_I^2 = 0.1074$),FSO链路传输距离Z

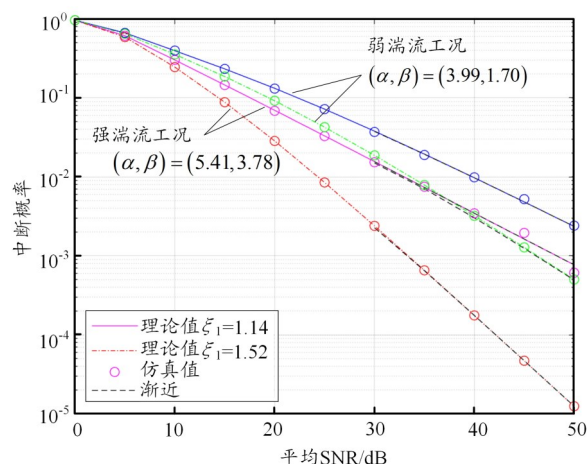
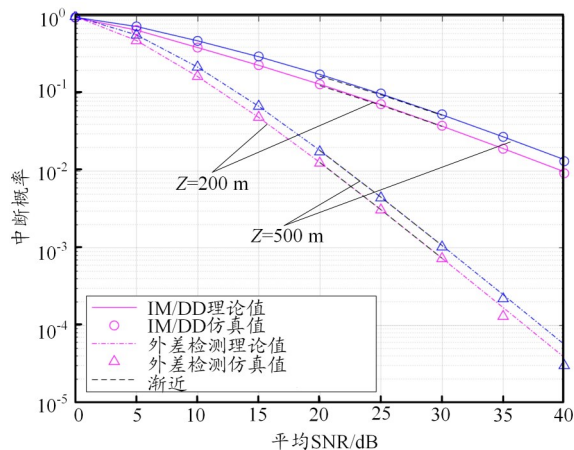


图3 混合FSO-UWOC系统在不同指向误差下的中断概率性能

对系统中断概率的影响如图4(a)所示。FSO链路和UWOC链路指向误差分别为 $\xi_1 = 1.14$ 和 $\xi_2 = 4.0$ 。可以看出,当FSO链路传输距离Z从200 m增大到500 m时,无论是IM/DD还是外差检测方案,系统中断概率曲线均明显上移,在相同平均SNR条件下,500 m距离的中断概率值显著高于200 m,这表明增大FSO链路传输距离会导致系统中断概率性能恶化。

在固定大气传输距离为200 m,且双跳链路指向误差均为 $\xi_1 = \xi_2 = 4.0$ 的条件下,UWOC链路传输距离d对系统中断概率的影响如图4(b)所示。增大UWOC链路传输距离d(从20~30 m)对系统性能的影响具有明显的SNR依赖性。可以看出,在低系统SNR区域,因UWOC链路距离增大导致中断概率性能明显恶化,而在高系统SNR区域,其中断概率性能下降且越来越减弱,最后趋于零。这一现象的根本原因在于系统中断概率的渐近特性。根据式(16)的渐近公式可知,高SNR时系统的中断概率由 α 、 β 、 ac 、 ξ_1^2 、 ξ_2^2 这5个衰



(a) FSO链路传输距离Z的影响

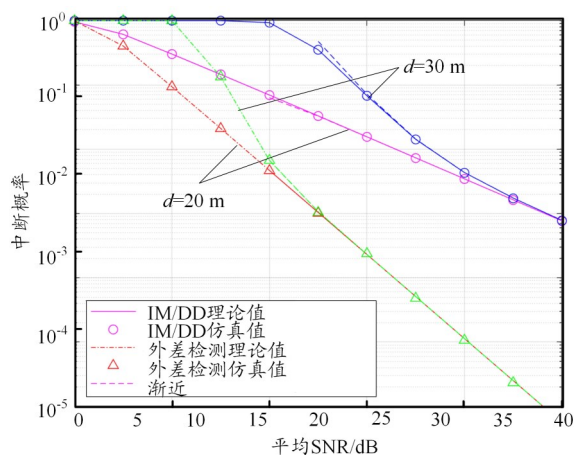
(b) UWOC链路传输距离 d 的影响

图4 不同链路传输距离对FSO-UWOC系统中中断概率影响

落参数决定。在本实验设置中,由于 $\xi_1 = \xi_2 = 4.0$ (弱指向误差),使得 ξ_1^2 与 ξ_2^2 远大于其余3个参数值($\alpha = 3.99$, $\beta = 1.70$, $ac=3.60$)。根据多元渐近分析理论,此时系统的渐近性能由最小的非指向误差参数决定,即大气湍流强度参数 $\beta = 1.70$,故在高SNR时,系统性能由FSO链路的大气湍流参数决定,与UWOC链路的传输距离无关。此外,图中高SNR时理论曲线与渐近线高度重合,验证了公式推导的正确性,以及不同UWOC距离下的中断概率曲线在高SNR区域逐渐收敛,证实了上述分析的合理性。

由图4可知,在相同参数设置的情况下,外差检测的性能总是优于IM/DD检测。这主要归因于外差检测通过本地振荡器与接收信号进行混频,完整保留信号的幅度、相位和偏振信息^[28];此外,外差检测通过载波相位恢复法能够消除相位噪声^[29],而IM/DD检测仅检测光强包络,完全丢失了相位和偏振信息。

4 结束语

本文主要研究基于DF机制和外差、IM/DD检测技术的FSO-UWOC混合双跳系统的中断概率性能。通过构建完善的FSO和UWOC链路复合衰落信道模型,利用高等超越函数推导出接收机采用不同检测方案时FSO链路和UWOC链路瞬时SNR的PDF和CDF数学通式,进而得出混合双跳FSO-UWOC系统平均中断概率的理论闭型表达式及高SNR下的渐近表达式。理论分析和数值仿真揭示了大气和海洋湍流强度、指向误差、链路传输距离等因素对系统中中断概率性能的显著影响,且外差检测性能远优于IM/DD方案。MC数值仿真验证了理论及渐近表达式的准确

周宇,李岳衡,王炜杰,等:FSO-UWOC混合双跳系统中中断概率性能分析

性,表明所提理论分析方法可为后续快速计算分析该系统中断概率提供有效支持。本文综合考虑双链路复合衰落因素,系统分析2种检测方式下的平均中断概率及渐近性能,揭示了系统性能极限。

参考文献:

- [1] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China-Information Sciences, 2021, 64 (1): 110301-1-110301-74.
- [2] ALI M F, JAYAKODY, D N, LI Y. Recent trends in underwater visible light communication (UVLC) systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 22169-22225.
- [3] MONDAL A, HOSSAIN A. Channel characterization and performance analysis of unmanned aerial vehicle-operated communication system with multihop radio frequency-free-space optical link in dynamic environment [J]. International Journal of Communication Systems, 2020, 33: e4568-1-e4568-14.
- [4] LI S, YANG Y, YANG L, et al. On the study of multiuser mixed dual-hop RF/THz systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72 (7): 9175-9188.
- [5] LI S, YANG L, 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.
- [6] YADAV S, VATS A, AGGARWAL M, et al. Performance analysis and altitude optimization of UAV-Enabled dual-hop mixed RF-UWOC system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70 (12): 12651-12660.
- [7] LEI H, ZHANG Y, PARK K H, et al. Performance analysis of dual-hop RF-UWOC systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-15.
- [8] SONY K, RAJESH B K, SUNEETHA C H, et al. Modelling system parameters for improvised performance in free space optics (FSO) networks[J]. International Journal of Economics and Empirical Research, 2023, 11: 10-14.
- [9] YANG L, ZHU Q, LI S, et al. On the performance of mixed FSO-UWOC dual-hop transmission systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(9): 2041-2045.
- [10] NAIK R P, CHUNG W Y. Performance evaluation of re-configurable intelligent surface-assisted underwater and free-space wireless optical communication in the skip-zones[J]. ICT Express, 2024, 10(3): 320-329.
- [11] JOSHI D, SHARMA D, SINGH H, et al. Performance analysis of mixed FSO-UWOC dualhop transmission system[C]//IEEE. Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies(IC2PCT). Greater Noida: IEEE, 2024: 658-662.
- [12] FARID AA, HRANILOVIC S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [13] OUBEI H M, ZEDINI E, ELAFANDY R T, et al. Simple statistical channel model for weak temperature-induced turbulence in underwater wireless optical communication systems[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2485-2488.

周宇,李岳衡,王炜杰,等: FSO-UWOC混合双跳系统中断概率性能分析

2455-2458.

[14] JAMALI M V, MIRANI A, PARSAY A, et al. Statistical studies of fading in underwater wireless optical channels in the presence of air bubble, temperature, and salinity random variations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(10): 4706-4723.

[15] ZEDINI E, OUBEI H M, KAMMOUN A, et al. Unified statistical channel model for turbulence-induced fading in underwater wireless optical communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(4): 2893-2907.

[16] ELAMASSIE M, MIRMIRKHANI F, UYSAL M. Performance characterization of underwater visible light communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 543-552.

[17] WANG J Y, MA Y, LU R R, et al. Hovering UAV-based FSO communications: channel modelling, performance analysis, and parameter optimization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2946-2959.

[18] LIN Z, XU G, ZHANG Q, et al. Average symbol error probability and channel capacity of the underwater wireless optical communication systems over oceanic turbulence with pointing error impairments[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 15327-15343.

[19] PROAKIS J G. Digital communications[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 2007.

[20] PRUDNIKOV A P, BRYCHKOV Y A, MARICHEV O I. Integrals and series: volume 3: more special functions[M]. Moscow: Revista De Ciencias Farmaceuticas, 1989.

[21] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series and products[M]. 7th edition. Boston: Academic Press, 2007.

[22] ANSARI I S, YILMAZ F, ALOUINI M S. Performance analysis of free-space optical links over Málaga (M) turbulence channels with pointing errors[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 1-6.

[23] 张馨文,李岳衡,江雨薇,等. GGD弱湍流环境含零视轴指向误差中继UWOC系统中断概率分析[J]. 电子学报, 2023, 51(11): 3294-3304.

[24] LI S, YANG L, COSTA D B D, et al. Performance analysis of mixed RF-UWOC dual-hop transmission systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 14043-14048.

[25] SIMON M K, ALOUINI M S. Digital communications over fading channels: a unified approach to performance analysis[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2005.

[26] Wolfram Research Inc. The wolfram functions site[EB/OL]. [2024-09-23]. <https://functions.wolfram.com>.

[27] KUMAR LB, RAMAVATH PN, KRISHNAN P. Performance analysis of multi-hop FSO convergent with UWOC system for security and tracking in navy applications[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(1): 327-1-327-26.

[28] AGRAWAL G P. Fiber-optic communication systems: 4th edition[M]. [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2010.

[29] KIKUCHI K. Coherent optical communications: historical perspectives and future directions[J]. High Spectral Density Optical Communication Technology, 2010, 6: 11-49.