

引用本文:郭萌,李岳衡,郝博学,等. RF-UWOC双跳DF中继系统中断性能研究[J]. 光通信技术,2026,50(1):25-32.

RF-UWOC双跳DF中继系统中断性能研究

郭萌,李岳衡*,郝博学,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:针对复合衰落信道下的射频-水下无线光通信(RF-UWOC)混合双跳中继系统中断性能,提出一种基于解码-转发(DF)协议的RF-UWOC混合双跳中继系统。通过分别构建RF链路的广义K衰落-大气损耗复合模型及UWOC链路的广义Gamma湍流-水下路径损耗-指向误差复合模型,推导了系统在DF协议下分别采用强度调制/直接检测(IM/DD)与外差检测(HD)时的中断概率精确闭式解及高信噪比渐近表达式。理论分析与仿真结果表明:系统性能受RF链路衰落参数与传输距离、UWOC链路湍流强度、指向误差及传输距离等因素共同影响;高信噪比下系统渐近性能由各信道衰落参数的相对大小决定。在相同参数配置下,HD性能显著优于IM/DD。

关键词:解码-转发;射频-水下无线光通信;复合信道衰落;中断概率;渐近性能

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0025-08

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.005

Research on the outage performance of RF-UWOC dual-hop DF relay systems

GUO Meng, LI Yueheng*, HAO Boxue, LYU Yong, JU Meiyan

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

Abstract: This paper presents an integrated channel modeling and performance analysis method for the outage performance of hybrid dual-hop radio-frequency-underwater wireless optical communication (RF-UWOC) relay systems under composite fading channels. By establishing a composite model combining generalized-K fading and atmospheric path loss for the RF link and a composite channel model that integrates generalized Gamma-distributed turbulence, underwater path loss, and pointing errors for the UWOC link, exact closed-form expressions for the outage probability are derived under decode-and-forward relaying with both intensity modulation/direct detection (IM/DD) and heterodyne detection (HD), together with asymptotic expressions at high signal-to-noise ratios. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that the system performance is jointly influenced by the fading parameters and transmission distance of the RF link as well as the turbulence intensity, pointing errors, and transmission distance of the UWOC link. At high SNRs, the asymptotic performance is determined by the relative magnitudes of the channel fading parameters. Under identical parameter configurations, HD significantly outperforms IM/DD.

Key words: decode and forward, radio frequency-underwater wireless optical communication, composite channel fading, outage probability, asymptotic performance

0 引言

水下无线光通信(UWOC)以其高信号带宽、低传

输延迟、保密性强、免频谱授权等诸多优点受到广泛关注^[1]。为满足陆地、空中与水下节点之间远距离信息传输的需求,跨介质混合中继通信系统应运而生,其中射频-水下无线光通信(RF-UWOC)与自由空间光-UWOC(FSO-UWOC)成为2种典型架构^[2-3]。

现有研究中,文献[3]提出了一种用于自主水下航行器(AUV)追踪的多跳FSO-UWOC系统,分析了Gamma-Gamma湍流与指向误差对FSO链路的影响,以及Lognormal分布建模的海洋湍流对UWOC链路的影响,并引入Beer-Lambert定律刻画路径损耗,然而,

收稿日期:2025-03-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(U23B20144)资助。

作者简介:郭萌(1998—),女,江苏徐州人,河海大学硕士研究生在读,主修专业是电子科学与技术,主要研究方向是水下无线光通信。

*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。



郭萌,李岳衡,郝博学,等: RF-UWOC 双跳 DF 中继系统中断性能研究

该模型未充分考虑多跳协同与动态追踪中的链路切换延迟及同步误差,在时变信道下的系统鲁棒性评估尚显不足。文献[4]研究了放大-转发(AF)机制下FSO-UWOC系统的中断性能,采用指数-广义伽马(EGG)分布描述水下湍流,但未考虑路径损耗。文献[5]探讨了可重构智能表面(RIS)辅助的FSO-UWOC系统,同样忽略了路径损耗与UWOC链路的指向误差。文献[6]研究了RIS辅助的双跳系统,其RF链路采用Nakagami-m与Rayleigh混合衰落模型,UWOC链路采用EGG模型,但未考虑路径损耗与指向误差的影响。文献[7]研究了悬停高度对中断概率的影响,其RF链路考虑了Nakagami-m衰落与大气路径损耗,UWOC链路则仅建模了EGG湍流。文献[8]探讨了非正交多址接入(NOMA)场景下的功率分配策略,其UWOC链路同样仅考虑了湍流衰落。文献[9]提出RIS辅助的多跳UWOC-RF上行系统,但未比较不同接收检测方案下的性能差异。综合现有研究可知,由于通信机制差异,水面以上FSO与RF链路的信道模型并不具备可比性。鉴于当前对RF-UWOC混合系统性能的综合分析尚未涉及RF链路中同时存在的小尺度衰落、大尺度阴影与路径损耗等多重因素的联合影响,本文提出一种基于解码-转发(DF)协议的RF-UWOC混合双跳中继系统。

1 系统与信道模型

本文的研究思路如下:首先,建立完整的混合双跳信道模型。针对RF链路,采用广义K分布结合大气路径损耗建模,以同时表征Nakagami-m小尺度衰落、Lognormal阴影效应与路径损耗的复合影响;针对UWOC链路,则构建一种新型复合信道模型,包含广义伽马分布(GGD)湍流、零视轴指向误差与Elamassie水下路径损耗。该模型兼顾准确性与表达简洁性,其中GGD可有效描述弱-中-强湍流,Elamassie模型相比传统Beer-Lambert定律能更精确刻画海水吸收、散射及几何损失^[10-11]。然后,在此信道模型基础上,推导采用DF中继的RF-UWOC系统的平均中断概率闭式解,并进一步给出高信噪比(SNR)下的渐近表达式。同时,系统比较接收端分别采用强度调制/直接检测(IM/DD)与相干检测(HD)2种方案时的性能差异。最后,通过蒙特卡洛(MC)数值仿真验证理论推导的正确性,并系统考察不同关键参数对系统中断性能的影响,从而为实际系统设计与优化提供参考。

本文研究的RF-UWOC混合双跳中继系统模型如图1所示。系统包含一个作为信号源S的空中无人驾

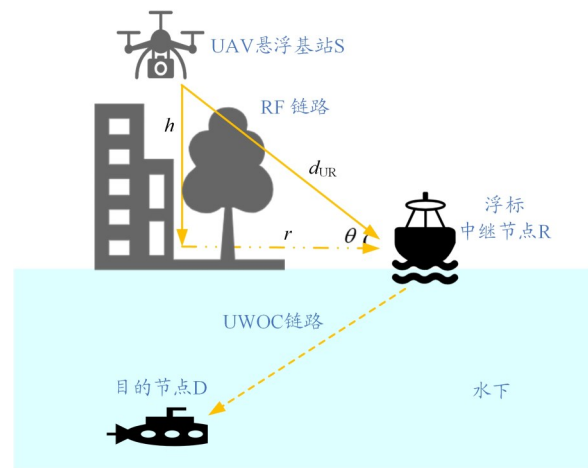


图1 RF-UWOC混合双跳中继系统模型

驶航空器(UAV)悬浮基站、一个具备DF能力的浮标中继节点R,以及一个水下目的节点D。UAV首先通过RF链路与R通信,R随后通过UWOC链路与D通信。假设第一跳RF链路经历广义K衰落与大气路径损耗,第二跳UWOC链路则建模为包含GGD湍流、零视轴指向误差和Elamassie水下路径损耗的复合衰落信道。其中,GGD模型适用于弱-中-强湍流环境,近岸/远洋水域(传输距离 ≤ 500 m),且考虑接收机存在随机抖动的场景;Elamassie模型适用于中短距离($\leq 1\,000$ m)近海水域传输(消光系数 $c_0 = 0.3 \sim 1.5 \text{ m}^{-1}$),并能精确计入几何损失。

1.1 S-R复合衰落链路瞬时接收SNR概率密度函数(PDF)推导

在RF链路,中继节点R处接收到的基带RF信号可表示为 $y_{\text{SR}} = \frac{\sqrt{P_1} h_1 x_t}{\sqrt{L_{\text{UR}}}} + n_1^{[12]}$, P_1 为瞬时信号的接收功率, L_{UR} 为路径损耗, h_1 为UAV与R之间的信道衰落系数, x_t 为从S发射的单位幅度开关键控信号, n_1 为均值为0、噪声功率为 σ_1^2 的加性高斯白噪声。

由图1可知,UAV与R之间的距离 $d_{\text{UR}} = \sqrt{h^2 + r^2}$,式中 h 为UAV在水平面上的高度, r 为UAV与R之间的水平距离;路径损耗指数 α 是仰角 θ 的函数, $\alpha(\theta) = a_1 P_{\text{LOS}}(\theta) + b_1^{[20]}$,其中 a_1 和 b_1 是与环境与信号频率有关的参数; $P_{\text{LOS}}(\theta)$ 表示S与R之间的传输路径,可视为视距(LOS)传输的概率, $P_{\text{LOS}}(\theta) = 1/(1 + a_2 e^{-b_2 \theta})$; $P_{\text{LOS}}(\theta)$ 随仰角 θ 的增大而单调递增,并满足 $P_{\text{LOS}}(\pi/2) = 1$ 与 $P_{\text{LOS}}(0) = 0$ 。因此,系数 a_2 和 b_2 需由经验值确定。不失一般性,本文取 $a_2 = 200, b_2 = 10$ 。

根据文献[12],RF链路的瞬时接收SNR $\gamma_1 =$

$\frac{P_1 h_1^2}{L_{UR} \sigma_1^2} = \frac{h_1^2 \bar{\gamma}_1}{L_{UR}}$, 式中 $\bar{\gamma}_1 = P_1 / \sigma_1^2$ 对应 RF 链路的平均 SNR。已知 RF 链路的信道衰落服从广义 K 分布,其瞬时接收 SNR γ_1 的 PDF 为

$$f_{\gamma_1}(\gamma_1) = \frac{1}{\gamma_1 \Gamma(m) \Gamma(k)} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{mkL_{UR}\gamma_1}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m \right] \quad (1)$$

式中: $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 为 Meijer-G 函数^[13], $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。 m 为 Nakagami- m 分布的参数,用于描述小尺度衰落的严重程度; k 为伽马分布的参数,用于描述大尺度衰落的强度。

1.2 S-R 复合衰落链路瞬时接收 SNR 累积分布函数 (CDF) 推导

将式(1)代入瞬时接收 SNR γ_1 的 CDF 定义式,有

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = \int_0^{\gamma_1} f_{\gamma_1}(x) dx = \frac{1}{\Gamma(m) \Gamma(k)} \int_0^{\gamma_1} \frac{1}{x} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{mkL_{UR}x}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m \right] dx \quad (2)$$

式中: x 为接收信号的包络。利用文献[14]中积分公式并进行相关参数对照,可将式(2)转化为

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = \frac{1}{\Gamma(m) \Gamma(k)} \int_0^{\gamma_1} \frac{1}{x} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{mkL_{UR}x}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m \right] dx \times \int_0^{\gamma_1} \frac{1}{x} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{mkL_{UR}x}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m \right] dx = \frac{1}{\Gamma(m) \Gamma(k)} G_{1,3}^{2,1} \left[\frac{mkL_{UR}\gamma_1}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m, 0 \right] \quad (3)$$

1.3 R-D 复合衰落链路瞬时接收 SNR 的 PDF 推导

假设 R-D 链路采用 DF 中继协议,其接收信号表达式为

$$y_{RD} = \eta \sqrt{P_2} h_2 \hat{s} + n_2 \quad (4)$$

式中: η 为 UWOC 链路的光/电转换系数, $\hat{s}$ 为中继节点 R 处的解码信号, P_2 为重构信号的发射功率, n_2 为均值为 0、方差为 σ_2^2 的 Gauss 随机变量。水下信道增益 h_2 由 3 个随机分量决定,可建模为 $h_2 = h_t h_p h_{12}$, 其中 h_t 、 h_p 、 h_{12} 分别表示 GGD 海洋湍流衰落、零视轴指向误差和水下路径损耗。

基于文献[14]给出的接收光强 h_3 的 PDF,进一步推导 UWOC 链路瞬时接收 SNR γ_2 的 PDF。已知接收信号表达式 $y_{RD} = \eta \sqrt{P_2} h_2 \hat{s} + n_2$ 。

瞬时 SNR γ_2 的 PDF 为

$$f_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\xi^2}{r \Gamma(a) \gamma_2} G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma_2}{\rho_{\bar{\omega}}} \right)^{\frac{c}{r}} \middle| \frac{c + \xi^2}{c}, a \right] \quad (5)$$

式中: ξ 为指向误差, a 和 c 为形状参数, b 为尺度参数,

A_0 为接收机于探测器中心处所收集到的激光束的功率比例, $\rho_{\bar{\omega}}$ 为不同的检测方式的 SNR。令 $\bar{\omega} = 1$, 表示 HD, $\bar{\omega} = 2$ 表示 IM/DD,则 2 种检测方式下的 SNR 可表示为:

$$\rho_1 = h_{12} \rho_{\text{heterodyne}} = \frac{\eta \sqrt{P_2} h_{12}}{\sigma_2^2}, \rho_2 = h_{12}^2 \rho_{\text{IM/DD}} = \frac{\eta^2 P_2 h_{12}^2}{\sigma_2^2}。$$

1.4 R-D 复合衰落链路瞬时接收 SNR 的 CDF 推导

将式(5)代入 CDF 定义式 $F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \int_0^{\gamma_2} f_{\gamma_2}(x) dx$, 有

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\xi^2}{r \Gamma(a)} \int_0^{\gamma_2} x^{-1} G_{1,2}^{2,0} \left[\left(\frac{1}{bA_0} \right)^c \rho_{\bar{\omega}}^{-\frac{c}{r}} x^{\frac{c}{r}} \middle| \frac{c + \xi^2}{c}, a \right] dx \quad (6)$$

根据文献[13]给出的表达式,将其中的 Meijer-G 函数转换为一阶 Mellin-Barnes 积分形式,再结合 Meijer-G 函数的定义式,通过观察和比较参数关系,可将式(6)转化为

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\xi^2}{c \Gamma(a)} G_{2,3}^{2,1} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma_2}{\rho_{\bar{\omega}}} \right)^{\frac{c}{r}} \middle| 1, \frac{\xi^2}{c} + 1, \frac{\xi^2}{c}, a, 0 \right] \quad (7)$$

2 混合双跳系统中断概率及其渐近性能分析

2.1 端到端 SNR 的 CDF 及其渐近值推导

对于 DF 中继方案,由于需要在中继节点 R 处进行解码并重构发射信号,RF 链路和 UWOC 链路的瞬时 SNR 是相互独立的,故而端到端链路的等效瞬时 SNR 可由 S-R 链路和 R-D 链路瞬时 SNR 二者间的最小值确定,即

$$\gamma^{\text{DF}} = \min(\gamma_1, \gamma_2) \quad (8)$$

对于 DF 中继协议, γ^{DF} 的 CDF 可以写成:

$$F_{\gamma^{\text{DF}}}(\gamma) = F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma) F_{\gamma_2}(\gamma) \quad (9)$$

将式(3)、式(7)代入式(9),则 γ^{DF} 的 CDF 表示为

$$F_{\gamma^{\text{DF}}}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m) \Gamma(k)} G_{1,3}^{2,1} \left[\frac{mkL_{UR}\gamma}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m, 0 \right] + \frac{\xi^2}{c \Gamma(a)} G_{2,3}^{2,1} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma}{\rho_{\bar{\omega}}} \right)^{\frac{c}{r}} \middle| 1, \frac{\xi^2}{c} + 1, \frac{\xi^2}{c}, a, 0 \right] - \frac{\xi^2}{c \Gamma(a) \Gamma(m) \Gamma(k)} \times G_{2,3}^{2,1} \left[\frac{mkL_{UR}\gamma}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m, 0 \right] \times G_{2,3}^{2,1} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma}{\rho_{\bar{\omega}}} \right)^{\frac{c}{r}} \middle| 1, \frac{\xi^2}{c} + 1, \frac{\xi^2}{c}, a, 0 \right] \quad (10)$$

为便于分析,假设 RF 链路与 UWOC 链路的平均

郭萌,李岳衡,郝博学,等: RF-UWOC 双跳 DF 中继系统中断性能研究

SNR 相同,即有 $\bar{\gamma}_1 = \rho_{\omega} = \bar{\gamma}$ 。根据文献[17]中 Meijer-G 函数的渐近展开公式,利用 Gamma 函数的性质,可以求出 $F_{\gamma_2}(\gamma)$ 的渐近表达式为

$$F_{\gamma_2}(\gamma) \approx \frac{\Delta_3 \gamma^{\frac{\xi^2}{r}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\xi^2}{r}}} + \frac{\Delta_4 \gamma^{\frac{ac}{r}}}{\bar{\gamma}^{\frac{ac}{r}}} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \Delta_3 = \frac{\Gamma\left(a - \frac{\xi^2}{c}\right)}{\Gamma(a)} \frac{1}{(bA_0)^{\xi^2}}, \Delta_4 = \frac{\xi^2}{c\Gamma(a)} \frac{1}{\left(\frac{\xi^2}{c} - a\right)a}$$

$$\frac{1}{(bA_0)^{ac}}$$

因此,当 $\rho_{\omega} = \bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma} \rightarrow \infty$ 时, $F_{\gamma^w}(\gamma)$ 可渐近表示为

$$F_{\gamma^w}(\gamma) \rightarrow \frac{\Delta_1 \gamma^k}{\bar{\gamma}^k} + \frac{\Delta_2 \gamma^m}{\bar{\gamma}^m} + \frac{\Delta_3 \gamma^{\frac{\xi^2}{r}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\xi^2}{r}}} + \frac{\Delta_4 \gamma^{\frac{ac}{r}}}{\bar{\gamma}^{\frac{ac}{r}}} \quad (12)$$

2.2 系统平均中断概率及其渐近值

在采用 DF 机制的 RF-UWOC 混合双跳中继系统中,系统的平均功率分配与链路 S-R(射频链路)和链路 R-D(水下无线光链路)的性能密切相关。S-R 链路功率需求:中继节点需正确解码 RF 信号,其接收功率需满足最低 SNR 阈值 γ_{th} ,否则无法有效转发信号。R-D 链路功率需求:解码后的信号经光/电转换后,需通过光发射机以足够功率传输至水下目标,以抵抗水下路径损耗和湍流衰落。

因此,当 RF-UWOC 混合双跳系统端到端链路的 SNR γ^{DF} 低于给定阈值 γ_{th} 时,系统信号传输中断,而计算此事件的概率即为系统平均中断概率。因此,设式(9)中的 $\gamma = \gamma_{th}$,则可得到所考虑的采用 DF 中继协议的 RF-UWOC 混合双跳系统的中断概率为

$$P_{out}^{DF} = F_{\gamma^w}(\gamma_{th}) = \frac{1}{\Gamma(m)\Gamma(k)} \times G_{1,3}^{2,1} \left[\frac{mkL_{UR}\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m, 0 \right] + \frac{\xi^2}{c\Gamma(a)} G_{2,3}^{2,1} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma_{th}}{\rho_{\omega}} \right)^{\frac{c}{r}} \middle| 1, \frac{\xi^2}{c} + 1 \right] - \frac{\xi^2}{c\Gamma(a)\Gamma(m)\Gamma(k)} G_{1,3}^{2,1} \left[\frac{mkL_{UR}\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_1} \middle| k, m, 0 \right] \times G_{2,3}^{2,1} \left[\frac{1}{(bA_0)^c} \left(\frac{\gamma_{th}}{\rho_{\omega}} \right)^{\frac{c}{\omega}} \middle| 1, \frac{\xi^2}{c} + 1 \right] \quad (13)$$

中断概率的物理意义是表征实际通信中低于质

量阈值的失效概率,主要受噪声、衰落、检测方式共同影响。中断概率渐近线的物理意义则是由信道衰落的统计特性(如多径、湍流)决定,来反应高 SNR 下的极限性能

因此,高平均 SNR 条件下,系统中断概率 P_{out}^{DF} 的渐近表达式可根据式(13)写为

$$F_{\gamma^w}(\gamma_{th}) \rightarrow \frac{\Delta_1 \gamma_{th}^k}{\bar{\gamma}^k} + \frac{\Delta_2 \gamma_{th}^m}{\bar{\gamma}^m} + \frac{\Delta_3 \gamma_{th}^{\frac{\xi^2}{\omega}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\xi^2}{\omega}}} + \frac{\Delta_4 \gamma_{th}^{\frac{ac}{\omega}}}{\bar{\gamma}^{\frac{ac}{\omega}}} \quad (14)$$

3 仿真结果与分析

本文采用 MC 仿真验证上述理论分析结果的准确性并考察核心参数对系统性能的影响。假设 UWOC 链路工作于近海海岸水质,其消光系数满足 $c_0 = 0.305 \text{ m}^{-1}$,其它用于系统仿真所需的重要参数的典型取值如表 1 所示^[10,15,18-20]。假设两跳链路的平均 SNR 相等,即满足: $\mu_r = \rho_r = \bar{\gamma}$,设置 $\gamma_{th} = 2 \text{ dB}$ 。

表 1 RF-UWOC 系统性能仿真主要参数

参数	数值
UAV 与 R 的水平距离/m	300、900、3 000
UAV 与 R 的竖直距离/m	400、2 000、4 000
RF 链路的广义 K 衰落参数 (m, k)	(0.5, 1.9)、(1.0, 1.9) (2.0, 2.6)
大气路径损耗计算相关参数 a_1, b_1, a_2, b_2	-1.5, 3.5, 200, 10
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	10、15、20
抖动离差 σ_s/cm	25、35、65
接收机半径 r_a/cm	30
海洋湍流闪烁指数 σ_I^2	0.107 4、0.206 6、0.454 8
GGD 形状参数 c	3

3.1 广义 K 分布参数对系统中断性能的影响

在不同 RF 链路广义 K 分布参数 (m, k) 取值下, RF-UWOC 混合双跳中继系统的平均中断概率随平均 SNR 变化的曲线如图 2 所示。仿真参数设置如下:第一跳 RF 链路采用广义 K 分布衰落信道,衰落系数 (m, k) 取(0.5, 1.9)、(1.0, 1.9)、(2.0, 2.6) 3 组^[21]; UAV 与 R 的水平距离 $r = 900 \text{ m}$,垂直距离 $h = 2 000 \text{ m}$ 。第二跳 UWOC 链路的参数为:指向误差 $\xi = 4.0$ (对应抖动离

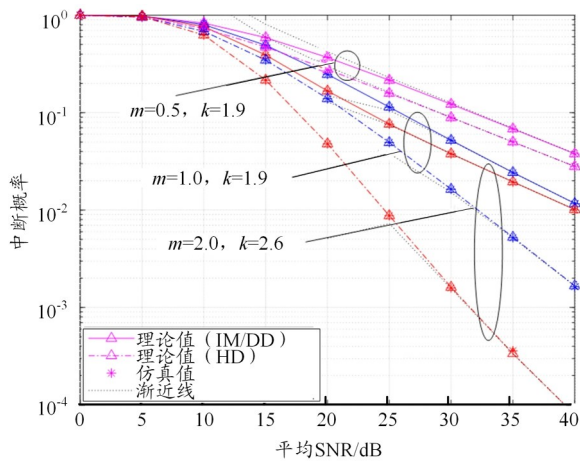


图2 不同广义K分布参数下

RF-UWOC 混合双跳系统中断概率随平均 SNR 变化的曲线

差 $\sigma_s = 25$ cm、接收机半径 $r_a = 30$ cm、光束宽度 $w_s = 30$ cm), 传输距离 $d = 20$ m, 海洋湍流闪烁指数 $\sigma_I^2 = 0.1074$ 。由图2可知,在固定 UWOC 链路参数的条件下,无论系统采用 IM/DD 还是 HD,其中断概率均随 RF 链路衰落参数(m, k)值的增大而显著降低。这是因为 m 值越大,信道越接近直达径信号较强的 Rician 衰落;而 k 值越大意味着阴影效应越弱。上述分析表明,RF 链路的广义 K 衰落特性对系统中断概率具有至关重要的影响。接收检测方案方面,由于 HD 属于相干检测,在相同系统平均 SNR $\bar{\gamma}$ 的条件下,其性能优于非相干的 IM/DD,可获得更低的系统中断概率。此外,系统理论计算值和 MC 仿真值高度吻合,且高 SNR 时的中断概率渐近线与对应理论值基本重合。这充分验证了前述系统中断概率理论表达式及其渐近线闭式解推导的正确性。

3.2 UAV 悬停高度与水平距离对系统中断性能的影响

混合双跳 RF-UWOC 中继通信系统在不同 UAV 悬停高度和水平距离下,系统中断概率理论值和 MC 仿真值随平均 SNR $\bar{\gamma}$ 变化的曲线如图3所示。RF 链路的参数设置:UAV 与 R 之间的水平及垂直距离(r, h)分别取(300 m, 400 m)、(900 m, 2000 m)、(3000 m, 4000 m)3组值,对应的直线距离分别为500、2193、5000 m;广义 K 衰落系数(m, k)=(1.0, 1.9)。第二跳 UWOC 链路的参数为:指向误差 $\xi = 4.0$,传输距离 $d = 20$ m,湍流闪烁指数 $\sigma_I^2 = 0.1074$ 。由图3可知,当 UWOC 链路参数固定时,混合系统的中断概率随 UAV 的(r, h)值的增大而上升。性能下降的主要原因是 UAV 与 R 之间的直线距离 d_{UR} 增大,导致路径损耗 L_{UR} 增加。但同样路径损耗下,系统中断概率仍随

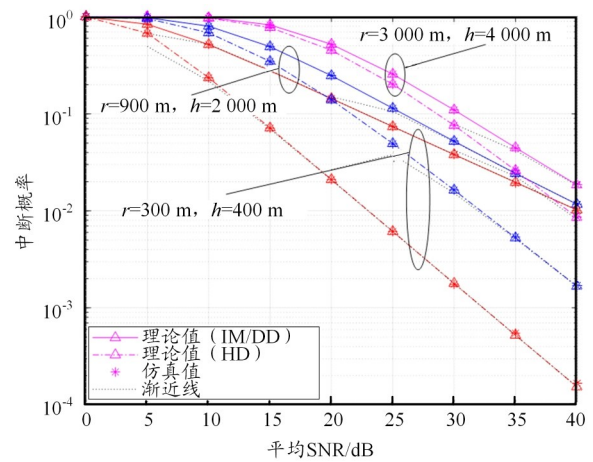


图3 不同 UAV 高度和水平距离下,

RF-UWOC 混合双跳系统中断概率随平均 SNR 变化的曲线

平均 SNR $\bar{\gamma}$ 的增大而降低,这表明提升接收 SNR 始终是改善系统性能的有效途径。在接收检测方案方面,得益于其相干检测特性,HD 在相同平均 SNR $\bar{\gamma}$ 下,系统中断概率始终低于非相干的 IM/DD 检测。

3.3 海洋湍流强度对系统中断性能的影响

在固定第一跳 RF 链路信道参数,并改变第二跳 UWOC 链路海洋湍流强度(闪烁指数 σ_I^2 分别取 0.1074、0.2066、0.4548)的条件下,混合双跳 RF-UWOC 中继通信系统的中断概率理论值和 MC 仿真值随平均 SNR $\bar{\gamma}$ 变化的曲线如图4所示。此时,设置第一跳 RF 链路中 UAV 与 R 之间的水平及垂直距离(r, h)=(900 m, 2000 m),广义 K 衰落系数(m, k)=(2.0, 2.6)。第二跳 UWOC 链路的指向误差 $\xi = 4.0$,传输距离 $d = 20$ m。由图4可知,当海洋湍流闪烁指数 σ_I^2 从 0.1074 增至 0.2066 时,系统中断概率曲线接近,性能恶化不明显;

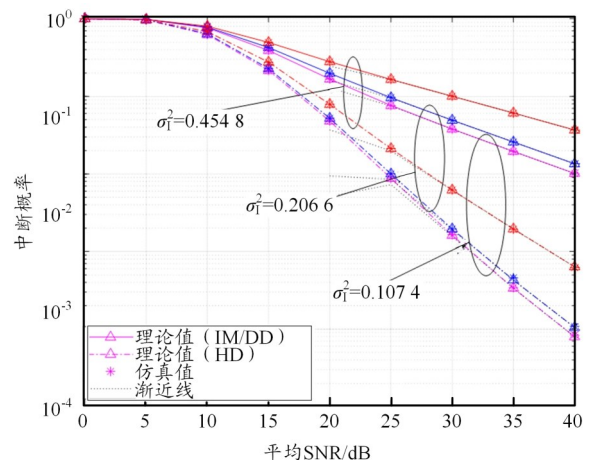


图4 不同海洋湍流强度下,

RF-UWOC 混合双跳系统中断概率随平均 SNR 变化的曲线

郭萌,李岳衡,郝博学,等: RF-UWOC 双跳 DF 中继系统中断性能研究

而当 $\sigma_1^2 = 0.4548$ 时,性能下降显著。其原因可由系统中断概率的渐近表达式(9)解释。该渐近值由参数 m 、 k 、 ac 、 ξ^2 这几个表征 RF 链路小尺度 Nakagami 衰落的强度、大尺度阴影衰落参数、海洋湍流强度、UWOC 链路指向误差的系统衰落参数有关。当 $\sigma_1^2 = 0.1074$ 或 0.2066 时,对应的 ac 分别为 3.60 和 2.02 ,相较于其它参数值: $(m, k) = (2.0, 2.6)$ 、 $\xi = 4.0$ 可以发现,高 SNR 区的性能主要由 $m=2$ 决定,受湍流影响较小。然而,当 $\sigma_1^2 = 0.4548$ 时, $ac = 1.01$ 成为所有参数中的最小值,从而主导了渐近性能,导致曲线明显恶化。此外,在相同湍流条件下,系统中断概率随平均 SNR $\bar{\gamma}$ 的增加而下降,且采用相干的 HD 进一步改善了性能。这说明提高接收 SNR 与采用相干检测均有利于提升系统性能。

3.4 接收机抖动离差对系统中断性能的影响

在固定第一跳 RF 链路信道参数,并改变第二跳 UWOC 链路抖动离差(σ_s 分别取 25 、 35 、 65 cm)的条件下,混合双跳 RF-UWOC 中继通信系统的中断概率理论值和 MC 仿真值随平均 SNR $\bar{\gamma}$ 变化的曲线如图 5 所示。此时,设置第一跳 RF 链路中 UAV 与 R 之间的水平及垂直距离 $(r, h) = (900 \text{ m}, 2000 \text{ m})$,广义 K 衰落系数为 $(m, k) = (2.0, 2.6)$ 。第二跳 UWOC 链路中,指向误差随抖动离差 σ_s 变化($\xi^2 = w_z^2/4\sigma_s^2$),其余参数固定:接收机半径 $r_a = 30 \text{ cm}$,光束宽度 $w_z = 30 \text{ cm}$,传输距离 $d = 20 \text{ m}$,海洋湍流闪烁指数 $\sigma_1^2 = 0.1074$ 。由图 5 可以看出,随着指向误差的抖动离差 σ_s 增大,系统中断概率曲线整体上移,性能下降。这是因为 σ_s 直接反映了接收光斑中心的抖动幅度: σ_s 值越大,意味着更多的信号能量偏离接收孔径,导致接收 SNR 下降,从

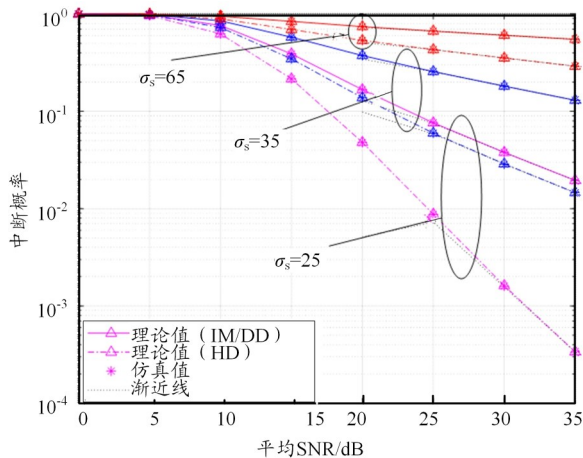


图5 不同抖动离差下,

RF-UWOC 混合双跳系统中断概率随平均 SNRS 变化的曲线

而抬高中断概率。此外,在相同的 σ_s 条件下,提高平均 SNR $\bar{\gamma}$ 或采用更优的检测方式(如相干检测),均可有效改善系统中断性能。

3.5 UWOC 链路传输距离对系统中断性能的影响

在固定第一跳 RF 链路信道参数,并改变第二跳 UWOC 链路传输距离($d = 10$ 、 15 、 20 m)时,混合双跳 RF-UWOC 中继通信系统的中断概率理论值和 MC 仿真值随平均 SNR $\bar{\gamma}$ 变化的曲线如图 6 所示。此时,设置第一跳 RF 链路中 UAV 与 R 之间的水平及垂直距离 $(r, h) = (900 \text{ m}, 2000 \text{ m})$,广义 K 衰落系数为 $(m, k) = (2.0, 2.6)$ 。第二跳 UWOC 链路的强指向误差 $\xi = 1.0$ (此时接收机半径 $r_a = 30 \text{ cm}$,光束宽度 $w_z = 30 \text{ cm}$),海洋湍流闪烁指数 $\sigma_1^2 = 0.1074$ 。由图 6 可知,随着传输距离 d 的减小,其所对应的混合双跳系统的中断概率性能越好。这主要是因为 d 的降低直接减少了水下路径损耗。与其它仿真结果一致,在相同参数设置下,HD 方案的性能明显优于 IM/DD 方案。此外,MC 仿真值和渐近线都能与理论值比较完美地匹配,这验证了本文所推导的中断概率理论公式及渐近表达式的正确性与合理性。

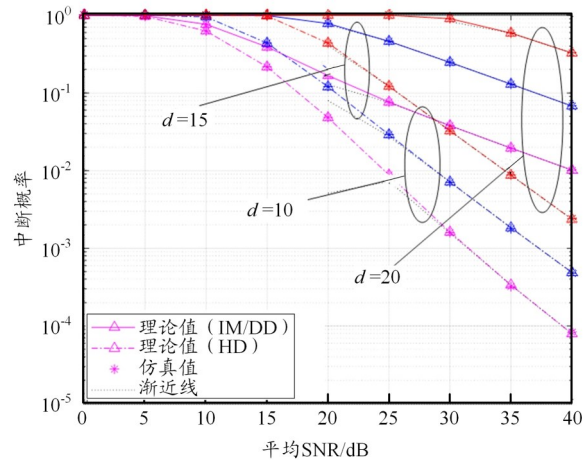


图6 不同 UWOC 链路传输距离下,

RF-UWOC 混合双跳系统中断概率随平均 SNR 变化的曲线

3.6 不同转发机制下的检测性能对比

混合系统在 AF 和 DF 这 2 种中继协议下,分别采用 IM/DD 与 HD 时的平均中断概率性能的 MC 仿真对比情况如图 7 所示。参数设置为:设置第一跳 RF 链路中 UAV 与 R 之间的水平及垂直距离 $(r, h) = (900 \text{ m}, 2000 \text{ m})$,广义 K 衰落系数为 $(m, k) = (0.9, 3.2)$ 。第二跳 UWOC 链路的参数为:指向误差 $\xi = 1.0$ (对应接收机半径 $r_a = 30 \text{ cm}$,光束宽度 $w_z = 30 \text{ cm}$),海洋湍流闪

烁指数 $\sigma_1^2 = 0.1074$ 。由图7可知,在DF机制下,采用HD的系统中断概率性能显著优于IM/DD检测,这与前文结果一致。相比之下,在AF机制下,HD检测的性能反而明显劣于IM/DD检测。2种检测方案带来的性能差异在高SNR区域更为显著。这表明,在实际工程应用中,需根据所采用的中继机制(DF或AF)来具体选择最优的检测方案,以提升系统整体性能。

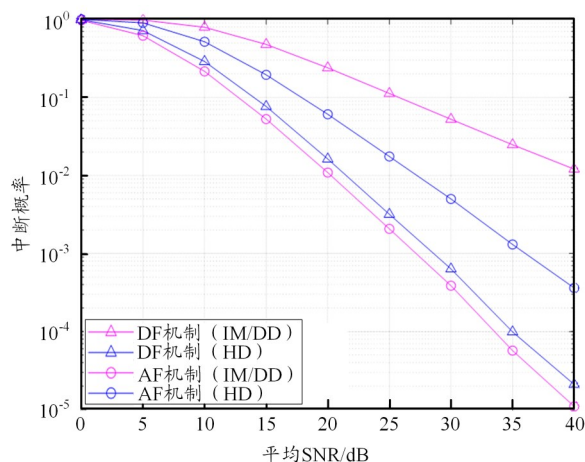


图7 不同转发机制下, RF-UWOC混合双跳系统中断概率随平均SNR变化的曲线

4 结束语

本文研究了采用DF中继的RF-UWOC混合双跳传输系统在复杂衰落环境下的中断性能,重点分析了接收端采用IM/DD与HD这2检测方案时的系统平均中断概率。首先,基于Meijer-G函数推导出系统端到端中断概率的精确闭式表达式,并利用其在零值附近的渐近展开,进一步得到了高SNR条件下的中断概率渐近表达式。由理论分析与数值仿真结果可知,RF链路的传输距离、广义K衰落系数(m, k),以及UWOC链路的海洋湍流、指向误差与路径损耗等参数,均对系统性能具有显著影响,即系统中断性能在渐近区域内主要由海洋湍流参数、指向误差因子、检测方案以及RF衰落参数之间的相对大小共同决定。

仿真结果表明:在相同参数配置下,系统中断概率随平均SNR的增加而降低;在相同SNR条件下,HD的性能显著优于IM/DD。这说明提高接收SNR与采用相干检测均为改善系统性能的有效途径。此外,本文给出的MC仿真结果与理论计算高度吻合,验证了所推导闭式解与渐近表达式的正确性,可为未来混合RF-UWOC系统的理论分析与快速性能评估提供依

据。本文亦对比了DF与AF 2种中继方案下的检测性能差异,为该领域的进一步研究提供了更全面的参考。

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] Deng H, Fu Z Y, Miao X Q, et al. Secure uplink transmissions in hybrid RF-UWOC space-ocean systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(7): 7816-7832.
- [3] Bhargave K, Ramavath P N, Krishnan P, et al. Performance analysis of multi-hop FSO convergent with UWOC system for security and tracking in navy applications[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(327): 1-26.
- [4] 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.
- [5] Ramavath P N, 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Samir A, Elsayed M, et al. Performance analysis of dual-hop hybrid RF-UOWC NOMA systems[J]. Sensors, 2022, 22: 4521-1-4521-17.
- [9] Zhou B, Wang P, Cao T, et al. Performance analysis of AUV-carried RISs-aided multihop UWOC convergent with RF MRC systems over WGG oceanic turbulence[J]. Vehicular Communications, 2024, 45: 100722.
- [10] Elamassie M, Miramirkhani F, Uysal M, et al. Performance characterization of underwater visible light communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 543-552.
- [11] 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.
- [12] Li S, Yabg L, Costa D B, et al. Performance analysis of UAV-based mixed RF-UWOC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(8): 5559-5572.
- [13] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of integrals, series and products [M]. 7th edition. Boston: Academic Press, 2007.
- [14] Prudnikov A P, Brychkov Y A, Marichev O I. Integrals and series: volume 3: more special functions[M]. Moscow: Revista De Ciencias Farmaceuticas, 1989.
- [15] 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): 2455-

郭萌,李岳衡,郝博学,等: RF-UWOC 双跳 DF 中继系统中断性能研究

2458.

[16] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702–1710.

[17] Wolfram. The Wolfram Functions Site [EB/OL]. [2024-09-23]. <https://functions.wolfram.com>.

[18] 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.

[19] Lin Z, Xu G J, Zhang Q Y, 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.

[20] Azari M M, Rosas F, Chen K C, et al. Ultra reliable UAV communication using altitude and cooperation diversity[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(1): 330–344.

[21] Bithas P S, Sagias N C, Mathiopoulos P T, et al. On the performance analysis of digital communications over generalized-K fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(5): 353–355.

[22] Proakis J G. Digital communications[M]. 5th edition. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 2007.

[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.