

混合衰落环境 SIMO-UWOC 系统选择性合并分集误码性能分析

朱家彬,李岳衡*,居美艳,吕勇,黄平,王媛,任杰

(河海大学 信息科学与工程学院,江苏 常州 213200)

摘要:为提升水下无线光通信系统在复杂海洋衰落环境中的误码率性能,构建了一个综合考虑广义Gamma分布海洋湍流、零视轴指向误差及Elamassie路径损耗的单入多出-水下无线光通信(SIMO-UWOC)系统,研究该系统选择性合并(SC)分集误码性能,并基于Meijer-G函数与多变量Fox-H函数推导出系统平均误码率的理论闭型表达式,通过蒙特卡洛仿真验证其正确性。仿真结果表明:相比单入单出(SISO)-UWOC系统,采用SC分集的SIMO-UWOC系统能显著提升误码性能与传输距离;在误码率为 10^{-6} 时,分集阶数为2、3、4对应的传输距离较SISO-UWOC系统分别提升126.5%、179.4%和203%,且性能随接收孔径增大及指向误差抖动减小而持续改善。

关键词:广义Gamma分布;指向误差;单入多出;水下无线光通信;平均误码率;选择性合并

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0015-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.003

Error performance analysis of SIMO-UWOC systems with selection combining diversity in mixed oceanic fading environment

ZHU Jiabin, LI Yueheng*, JU Meiyan, LYU Yong, HUANG Ping, WANG Yuan, REN Jie

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

Abstract: To improve the bit error rate performance of underwater wireless optical communication systems in complex oceanic fading environments, a single-input multiple-output underwater wireless optical communication(SIMO-UWOC) system is established, which comprehensively considers generalized Gamma-distributed ocean turbulence, zero boresight pointing errors, and Elamassie path loss. The selective combining(SC) diversity bit error performance of this system is investigated. Based on the Meijer-G function and the multivariate Fox-H function, a theoretical closed-form expression for the system's average bit error rate is derived, and its correctness is verified through Monte Carlo simulations. Simulation results show that compared to a single-input single-output(SISO)-UWOC system, the SIMO-UWOC system employing SC diversity significantly improves bit error performance and transmission distance. At a bit error rate of 10^{-6} , the transmission distances corresponding to diversity orders of 2, 3, and 4 are increased by 126.5%, 179.4%, and 203%, respectively, compared to the SISO-UWOC system. Furthermore, performance continues to improve as the receiving aperture increases and pointing error jitter decreases.

Key words: generalized Gamma distribution, pointing error, single-input multiple-output, underwater wireless optical communication, average bit error rate, selection combining

收稿日期:2025-02-17。

基金项目:国家自然科学基金项目(U23B20144)资助。

作者简介:朱家彬(1999—),男,江苏南通人,硕士研究生,就读于河海大学信息科学与工程学院信号与信息处理专业,主要研究方向为水下无线光通信。在校期间荣获优秀研究生、优秀毕业生、优秀共青团员等荣誉称号。

*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。



0 引言

随着海洋资源勘探、环境监测与国防安全等领域对高速信息传输需求的日益增长,实现水下复杂环境中的可靠高效通信已成为一项紧迫挑战。传统的水声通信受限于低速率与高延迟,而水下射频通信则面临严重衰减与带宽瓶颈。相比之下,水下无线光通信(UWOC)凭借其高带宽、低时延、强保密性及无需频谱许可等突出优势,被视为下一代水下高速通信的关键

朱家彬,李岳衡,居美艳,等:混合衰落环境SIMO-UWOC系统选择性合并分集误码性能分析

技术之一,具有广阔的应用前景^[1-2]。

然而,UWOC在实际海洋环境中的部署仍面临一系列信道损伤的严峻考验。一方面,海水中溶解的盐分、叶绿素及悬浮颗粒等成分会对光信号(尤其是蓝绿光窗口)产生强烈的吸收与散射,导致严重的路径损耗^[3];另一方面,海水温度与盐度的随机起伏以及气泡等因素会引发折射率的随机变化,产生光强闪烁效应,即海洋湍流衰落^[4]。这些因素共同构成复杂的混合衰落信道,直接影响系统的误码率、中断概率与信道容量等核心性能指标,因此亟需开展针对性研究。

近年来,学界已围绕湍流与指向误差等单一或部分因素对UWOC系统性能的影响开展了大量工作。例如:文献[5-6]研究了弱湍流下存在指向误差时中继系统的中断性能;文献[7]基于对数正态与瑞利分布对湍流与链路失准进行建模,探讨了多人多出(MIMO)系统的性能,但未考虑水下路径损耗的影响;文献[8]虽同时考虑了路径损耗、湍流与指向误差,但其路径损耗采用较为简化的Beer-Lambert单指数模型,且湍流采用Gamma-Gamma分布,与实际海洋环境的拟合度不高。文献[9]研究了广义Gamma分布(GGD)湍流信道中单入单出(SISO)系统的性能,文献[10]则分析了多人单出(MISO)系统在湍流与指向误差复合信道中的容量。实验研究表明,在多种湍流统计模型中,GGD与指数-广义Gamma(EGG)模型能准确匹配实测数据^[11-12],而Elamassie模型能更精确地描述实际水下路径损耗^[13]。

综上所述,现有研究大多侧重于单一衰落因素或采用简化信道模型,未能全面、准确地刻画实际海洋中湍流、指向误差与更贴合实际的水下路径损耗三者并存的混合衰落特性。为此,本文在GGD海洋湍流、指向误差以及Elamassie路径损耗共同作用下,研究混合衰落环境单入多出(SIMO)-UWOC系统选择性合并(SC)分集误码性能。

1 系统模型

1.1 混合衰落接收信道模型

本文所研究的SIMO-UWOC系统传输架构原理框图如图1所示。为简化分析,假设该系统位于近海环境中的深海;发射端具有单个光源节点S,位于垂直XOY平面内圆面,且S与接收目标节点D之间的距离设为 d ;接收端配置有 M 个接收单元,并令 M 个接收机均匀分布在XOY平面内的圆周上。

当可见光信号通过水下混合衰落信道传输时,接

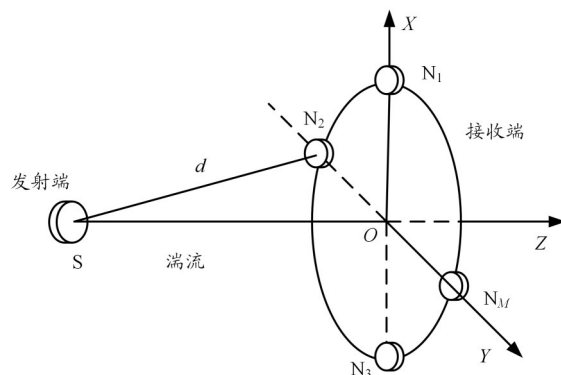


图1 SIMO-UWOC系统传输架构原理框图

收机所接收到的信号光强度可表示为

$$I_r = 2Pxh_Lh_M \quad (1)$$

式中: x 为开关键控(OOK)强度调制符号, $x \in \{0, 1\}$; P 为OOK发射信号的平均功率; h_M 为从 M 条独立路径中选出的最优路径所对应的复合信道衰落系数(含GGD湍流效应与指向误差),由水下路径损耗、GGD海洋湍流效应和零视轴指向误差共同构成。路径损耗 h_L 可用经Monte Carlo数据拟合验证的Elamassie理论模型来表征^[13],其数学表达式为

$$h_L = \left(\frac{D_r}{\theta_{ve}d}\right)^2 e^{-c_0 d \left(\frac{D_r}{\theta_{ve}d}\right)^t} \quad (2)$$

式中: D_r 为接收机孔径直径, θ_{ve} 为光束发散角, d 为链路传输距离; c_0 为消光系数,由海水的水质决定; t 为修正系数。

考虑GGD海洋湍流效应和零视轴指向误差, $h_M = h_p h_A$,其中 h_p 表示零视轴指向误差, h_A 表示GGD海洋湍流效应。零视轴指向误差 h_p 的数学表达式^[14]为

$$h_p = [\text{erfc}(v)]^2 \exp\left(-\frac{2u^2}{w_{zeq}^2}\right) \quad (3)$$

式中: w_{zeq} 为等效光束宽度, $w_{zeq}^2 = \frac{w_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$, w_z 为距

光源 z 处的光束宽度, $v = \frac{\sqrt{\pi} D_r}{\sqrt{2} w_z}$ (v 表示接收机孔径

D_r 与光束宽度 w_z 的比值), u 为径向随机抖动。

经推导,零视轴指向误差的概率密度函数(PDF)^[14]为

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0^{\gamma^2}} h_p^{\gamma^2-1} \quad (4)$$

式中: $0 \leq h_p \leq A_0$, $\gamma = \frac{w_{zeq}}{2\sigma_s}$, σ_s 为抖动标准差。GGD弱湍流效应 h_A 的PDF^[11]为

$$f_{h_A}(h_A) = \frac{ch_A^{ac-1}}{b^a \Gamma(a)} \exp\left[-\left(\frac{h_A}{b}\right)^c\right] \quad (5)$$

式中: b 为GGD的尺度参数, a 和 c 则为GGD的形状参数, $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数运算符。定义 σ_1^2 为归一化接收光强的闪烁指数^[12],根据约束条件 $E[h_A] = 1$,可得 a 、 b 、 c 和 σ_1^2 之间的关系式为

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = \frac{\Gamma(a)\Gamma\left(a + \frac{2}{c}\right)}{\Gamma^2\left(a + \frac{1}{c}\right)} - 1 \\ b = \frac{\Gamma(a)}{\Gamma\left(a + \frac{1}{c}\right)} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)的计算关系,通过预先指定反映光强的闪烁指数 σ_1^2 值和给定GGD形状参数 c 值,即可最终确定GGD模型中的其它所需参数。

1.2 复合衰落信道系数PDF和累积分布函数(CDF)

根据随机变量函数值的PDF的推导准则^[15]及文献[16],可得复合衰落信道系数 h 的PDF、CDF表达式分别如式(7)、式(8)所示。

$$f_h(h) = C_1 h_M^{ac-1} G_{l_1, k_1+l_1}^{k_1+l_1, 0} \left[C_2 h^{l_1} \middle| \begin{matrix} \Delta(l_1, \gamma^2-ac+1) \\ \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0) \end{matrix} \right] \quad (7)$$

$$F_{h_M}(h_M) = \int_0^{h_M} f_{h_M}(h_M) dh_M = C_1 \frac{1}{c} h_M^{ac} G_{2, 3}^{2, 1} \left[C_2 h_M^c \middle| \begin{matrix} 1-a, \frac{\gamma^2-ac+c}{c} \\ \frac{\gamma^2-ac}{c}, 0, -a \end{matrix} \right] \quad (8)$$

式中: l_1, k_1 为非负整数,其比值满足 $\frac{l_1}{k_1} = c; \Delta(k, d) =$

$$\left(\frac{d}{k}, \frac{d+1}{k}, \dots, \frac{d+k-1}{k} \right), \quad C_1 = \frac{c\gamma^2 \sqrt{k_1}}{(A_0 b)^{ac} \Gamma(a)}, \quad C_2 = \frac{1}{(b^c k_1)^{k_1} (A_0)^{l_1}},$$

$G_{p, q}^{m, n}(\cdot)$ 为Meijer-G函数^[16]。

2 平均误码率分析和数值仿真

2.1 平均误码率分析

在SC分集下,SIMO-UWOC系统的最终接收信号表示为 $y = 2\eta P x h_L h_{\max} + n, h_{\max} = \max\{h_1, h_2, \dots, h_M\}$, η 为光电转换系数; n 为最终选中的接收支路接收机端噪声随机变量,满足均值为零、方差为 σ^2 。若接收机选用PIN光电二极管,则噪声主要来源于热噪声^[17],其方差计算式可表示为 $\sigma^2 = \frac{4KTB}{R}$,式中 K 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度, B 为放大器滤波带宽, R 为负载电阻值。当接收端采用强度调制-直接检测(IM/DD)方案时,可推导出SC分集下SIMO-UWOC系统的总误

码率为 $p_{sc} = Q\left(\frac{\eta P h_L h_{\max}}{\sigma}\right)$, $Q(\cdot)$ 为标准正态分布的互补累积分布函数。根据文献[18-21]、式(8)、 F_{ox} 函数式(9)、 F_{ox2} 函数式(10),最终可求得SC分集下SIMO-UWOC系统以多元Fox-H函数 $H_{p, qp; q_1; \dots; m; n}^{0, nm_1, n_1; \dots; m; n}$ 表示的平均误码率通式为

$$F_{ox1} = \left(1 - \frac{Mac}{2}; \frac{c}{2}, \dots, \frac{c}{2}\right); (1-a, 1), \left(\frac{\gamma^2-ac+c}{c}, 1\right); \dots; (1-a, 1), \left(\frac{\gamma^2-ac+c}{c}, 1\right); \left(\frac{\gamma^2-ac+c}{c}, 1\right) \quad (9)$$

$$F_{ox2} = -\left(\frac{\gamma^2-ac}{c}, 1\right), (0, 1), (-a, 1); \dots; \left(\frac{\gamma^2-ac}{c}, 1\right), (0, 1), (-a, 1); \left(\frac{\gamma^2-ac}{c}, 1\right), (0, 1) \quad (10)$$

$$P_e^{SC} = \frac{MC_1^M}{24c^{M-1}C_3^{\frac{2}{3}}} H_{1, 0; 2, 1; \dots; 2, 1; 2, 0}^{0, 1; 2, 1; \dots; 2, 1; 2, 0} \left[\begin{matrix} \frac{C_2}{C_{3,1}^{\frac{c}{2}}} \\ \vdots \\ \frac{C_2}{C_{3,M}^{\frac{c}{2}}} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} F_{ox1} \\ F_{ox2} \end{matrix} \right] + \frac{MC_1^M}{8c^{M-1}C_4^{\frac{2}{2}}} H_{1, 0; 2, 1; \dots; 2, 1; 2, 0}^{0, 1; 2, 1; \dots; 2, 1; 2, 0} \left[\begin{matrix} \frac{C_2}{C_{4,1}^{\frac{c}{2}}} \\ \vdots \\ \frac{C_2}{C_{4,M}^{\frac{c}{2}}} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} F_{ox1} \\ F_{ox2} \end{matrix} \right] \quad (11)$$

式中: $C_{3,M} = \frac{\eta^2 P^2 h_L^2}{2\sigma^2}, C_{4,M} = \frac{2\eta^2 P^2 h_L^2}{3\sigma^2}; H_{p, qp; q_1; \dots; m; n}^{0, nm_1, n_1; \dots; m; n}$

可依据文献[22]给出的GPU-Matlab程序包进行求解。

2.2 仿真参数设置

本文通过计算机仿真,研究所提出的混合衰落信道模型下,接收端采用SC分集的SIMO-UWOC系统的平均误码率性能,验证上述推导所得理论误码率闭型表达式的正确性,并比较传统SISO-UWOC系统与SC分集SIMO-UWOC系统中,不同核心参数的选取对系统平均误码率性能的影响。

不失一般性,仿真选取近海海岸常见水质作为水下环境,该水质条件下的吸收系数和散射系数取值参见文献[23],其它主要仿真参数如表1^[11-12,14,23-25]所示。

2.3 平均误码率仿真结果与分析

当链路传输距离 $d=10$ m、GGD弱湍流闪烁指数 $\sigma_1^2=0.1074$ 、接收机孔径 $D_r=0.1$ m、抖动标准差 $\sigma_r=20$ cm时,弱湍流环境下SC分集SIMO-UWOC系统的

朱家彬,李岳衡,居美艳,等:混合衰落环境SIMO-UWOC系统选择性合并分集误码性能分析

表1 数值仿真主要参数

参数	数值
传输距离 d/m	10
接收机端口 M	1、2、3、4
全宽发射机光束发散角 $\theta_{1/e}/(^{\circ})$	6
修正系数 T	0.1
闪烁指数 σ_I^2	0.107 4、0.120 9、 0.456 1、0.564 1、1.012 2
光/电转换系数 $\eta/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.85
玻尔兹曼常数 $K/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	1.38×10^{-23}
开尔文温度 T_{v}/K	290
负载电阻 R/Ω	100
滤波器带宽 B/GHz	1.5
GCD模型形状参数 c	3
抖动标准差 σ_s/cm	15、20
光束宽度 w_z/cm	40
接收机位置	深海(忽略气水交界面和 背景辐射影响)

平均误码率随发射功率变化的曲线如图2所示。可以看出,理论值与仿真值基本重合;采用SC分集技术的SIMO-UWOC系统的平均误码率性能显著优于SISO-UWOC系统,且随着平均发射功率和分集阶数 M 的增加,性能改善更为明显。

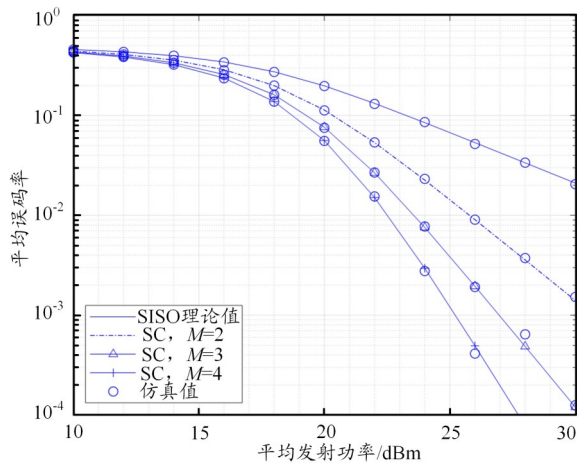


图2 弱湍流环境下,2种系统平均误码率随平均发射功率变化曲线

以系统平均误码率 2×10^{-2} 为例,达到该误码率时,SISO-UWOC系统所需平均发射功率为30 dBm,而分集阶数 M 为2、3、4的SIMO-UWOC系统所需平均发射功率分别为24.5、22.6、21.8 dBm。与SISO-UWOC系统相比,SIMO-UWOC系统所需功率分别降低了约18.3%、24.7%和27.3%。这表明SC分集技术是UWOC系统中有效抑制复杂信道衰落的重要手段之一。

在链路传输距离 $d=10\text{ m}$ 、接收机孔径 $D_r=0.1\text{ m}$ 、平均发射功率 $P=25\text{ dBm}$ 以及抖动标准差 $\sigma_s=20\text{ cm}$ 时,弱湍流环境取闪烁指数值 $\sigma_I^2=0.1074$,中-强湍流取 $\sigma_I^2=0.5641$,强湍流取 $\sigma_I^2=1.0122$ ^[11-12]。在这3种湍流环境下,SC分集SIMO-UWOC系统平均误码率随分集阶数 M 变化的曲线如图3所示。由于式(9)给出的误码率理论闭型表达式在 M 值较大时($M \geq 7$)计算复杂度急剧增加,因此图中仅给出了 $M \leq 6$ 的理论计算结果,且理论值与Monte Carlo仿真值基本重合。从图3可以看出,随着分集阶数 M 的增大,弱、中、强3种湍流强度下采用SC分集合并的SIMO-UWOC系统的平均误码率性能均呈现持续改善的趋势。

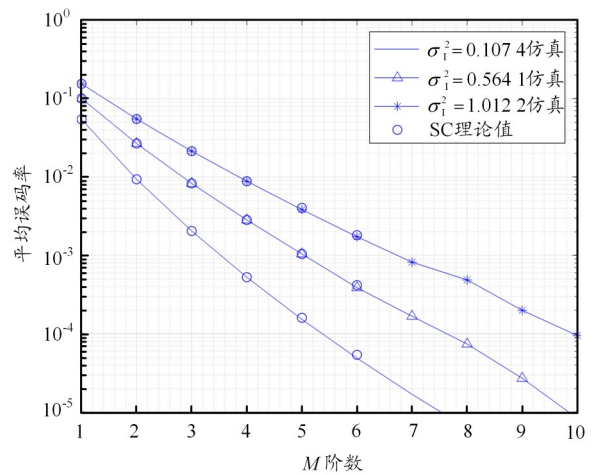


图3 弱、中、强湍流环境下,

SIMO-UWOC系统平均误码率随分集阶数 M 变化曲线

当链路传输距离 $d=10\text{ m}$ 、接收机孔径 $D_r=0.1\text{ m}$ 、抖动标准差 $\sigma_s=20\text{ cm}$ 、接收端个数 $M=3$ 、发射功率固定为30 dBm时,弱、中、强3种湍流环境下SC分集接收SIMO-UWOC系统平均误码率随湍流强度变化的曲线如图4所示。可以看出,理论值与仿真值基本重合;SIMO-UWOC系统在中等湍流($\sigma_I^2=0.5641$)和强湍流($\sigma_I^2=1.0122$)下的平均误码率分别为 1.3×10^{-3} 和 6×10^{-3} ,相较于弱湍流($\sigma_I^2=0.1074$)下的误码率 1.3×10^{-4} ,系统性能下降显著。这表明在相同的分集阶数 M 下,湍流强度的增大会明显恶化系统性能;然而,在相同湍流强度下,增加分集阶数 M 可有效降低系统的平均误码率。

当链路传输距离 $d=10\text{ m}$ 、中-强湍流闪烁指数 $\sigma_I^2=0.5641$ 、平均发射功率 $P=25\text{ dBm}$ 以及抖动标准差 $\sigma_s=20\text{ cm}$ 时,得到中强湍流环境下SISO-UWOC系统、SC分集SIMO-UWOC系统平均误码率随接收机孔径变化的曲线如图5所示。可以看出,理论值与仿真值基

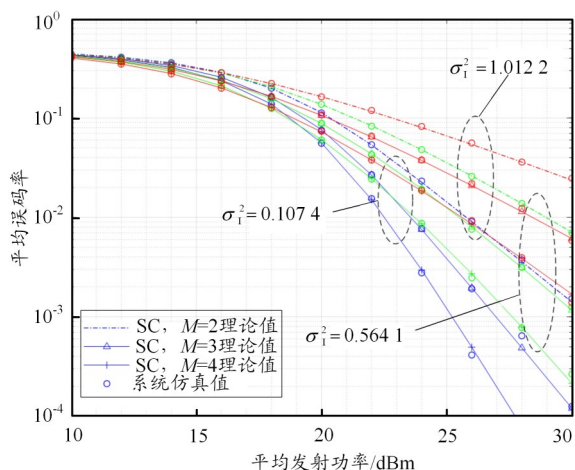


图4 弱、中、强湍流环境下, SIMO-UWOC系统平均误码率随平均发射功率变化曲线

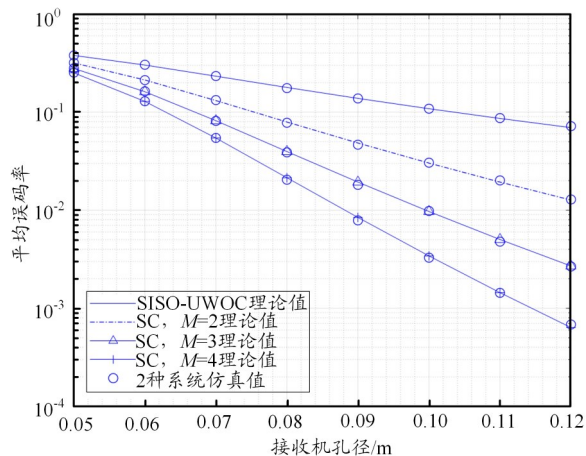


图5 中强湍流环境下,2种系统平均误码率随接收机孔径变化曲线

本重合;在相同接收端口配置时,2种系统平均误码率随接收机孔径的增大而不断下降。当 $M=4$ 时,SIMO-UWOC系统在接收机孔径为 $D_r=0.1\text{ m}$ 与 $D_r=0.12\text{ m}$ 下的平均误码率从 3.5×10^{-3} 下降至 6.3×10^{-4} 。同时,在相同接收孔径下,SC分集阶数 M 的提升也能显著改善误码性能。相比SISO-UWOC系统,采用SC分集的SIMO-UWOC系统在误码率性能上表现出明显的优势。

当链路传输距离 $d=10\text{ m}$ 、湍流闪烁指数 $\sigma_1^2=1.0122$ 、平均发射功率 $P=25\text{ dBm}$ 以及接收机孔径 $D_r=0.1\text{ m}$ 时,得到强湍流环境下SC分集SIMO-UWOC系统平均误码率随抖动标准差 $\sigma_s=15\text{ cm}$ 变化的曲线如图6所示。可以看出,理论值与仿真值基本重合;当 $M=4$ 时, σ_s 从 20 cm 减小至 15 cm ,相应的平均误码率从 9×10^{-3} 下降至 3.5×10^{-3} ,性能改善显著。当平均

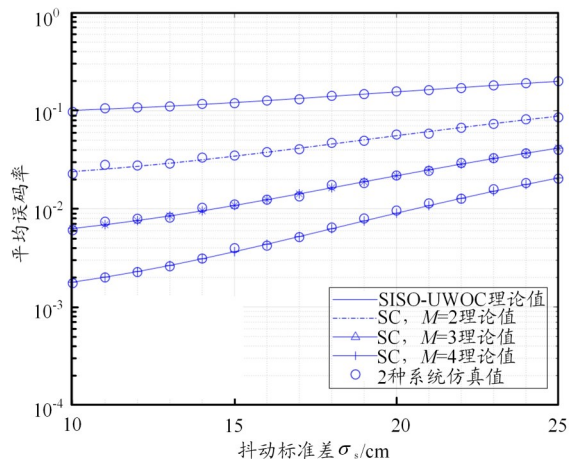


图6 强湍流环境下,2种系统平均误码率随抖动标准差变化曲线

发射功率 $P=25\text{ dBm}$ 、GGD弱湍流闪烁指数 $\sigma_1^2=0.1074$ 、接收机孔径 $D_r=0.1\text{ m}$ 、抖动标准差 $\sigma_s=20\text{ cm}$ 时,得到SC分集SIMO-UWOC系统平均误码率随传输距离变化的曲线如图7所示。可以看出,理论值与仿真值基本重合;采用SC分集技术的SIMO-UWOC系统的平均误码率性能优于SISO-UWOC系统,且随着传输距离的缩短和分集阶数 M 的增加,性能提升更为明显。以系统平均误码率 1×10^{-3} 为例,达到该误码率时,SISO系统最大传输距离为 3.4 m ,而分集阶数 $M=2,3,4$ 的SIMO-UWOC系统的最大传输距离分别为 $7.7, 9.5, 10.3\text{ m}$ 。与SISO系统相比,SIMO系统的传输距离分别增加了约 $126.5\%, 179.4\%$ 和 203% 。

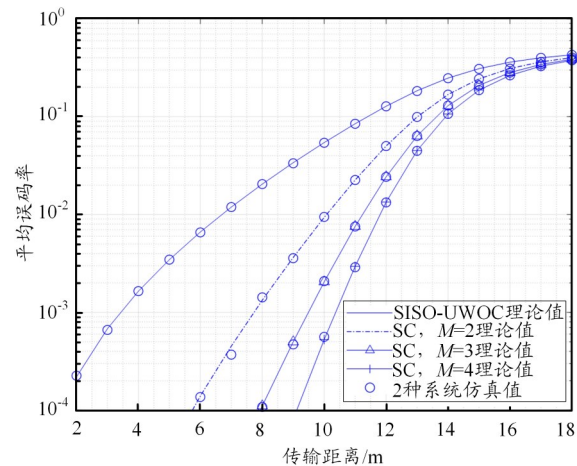
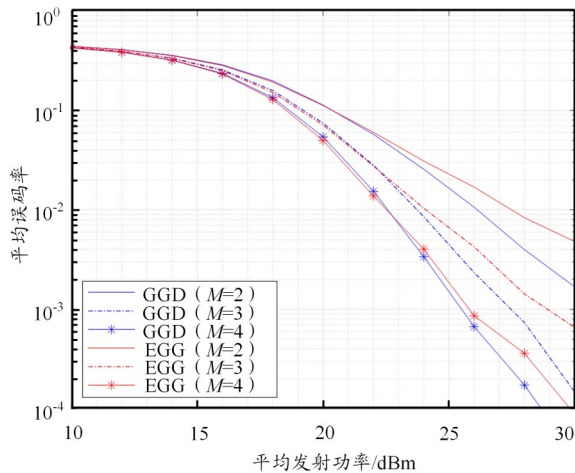


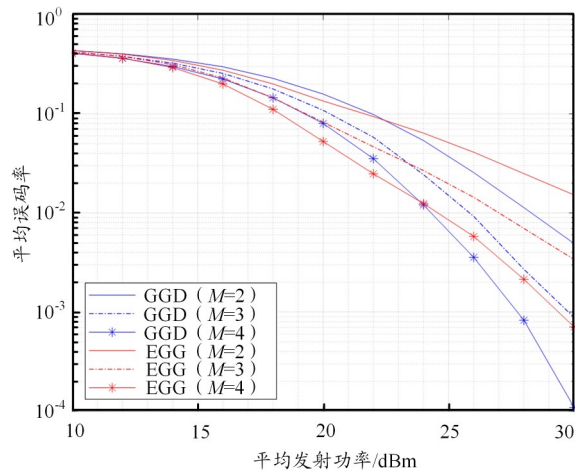
图7 2种系统平均误码率随传输距离变化曲线

根据文献[12, 25],本文选取GGD与EGG这2种湍流模型对应的湍流闪烁指数 σ_1^2 ,得到弱、中-强湍流环境下,SC分集SIMO-UWOC系统平均误码率随平均发射功率变化的曲线如图8所示。可以看出,在相同湍

朱家彬,李岳衡,居美艳,等:混合衰落环境SIMO-UWOC系统选择性合并分集误码性能分析



(a) 弱湍流环境



(b) 中强湍流环境

图8 GGD/EGG模型在弱、中强湍流环境下,

SC分集SIMO-UWOC系统平均误码率随平均发射功率变化曲线

流强度下,GGD与EGG模型对应的不同分集阶数 M 的SIMO-UWOC系统平均误码率随发射功率变化的仿真曲线大致相近,表明2种模型在该场景下具有相似的性能表征能力。

当传输距离 $d = 10$ m、平均发射功率 $P = 25$ dBm、湍流闪烁指数 $\sigma_I^2 = 0.1074$ 、接收机孔径 $D_r = 0.1$ m、抖动标准差 $\sigma_s = 15$ cm时,得到弱湍流环境下SC、MRC与EGC这3种分集SIMO-UWOC系统平均误码率随平均发射功率变化的曲线如图9所示。相较于SISO-UWOC系统,采用SC、最大比合并(MRC)、EGC这3种分集合并技术的SIMO-UWOC系统均能显著改善误码性能。在相同单支路发射功率及其它参数条件下,3种分集技术的性能排序为:MRC最佳,EGC次之,SC相对最弱;且随着 M 的增大,三者之间的性能差距逐渐扩大,但总体而言,其绝对性能差异并不显著。

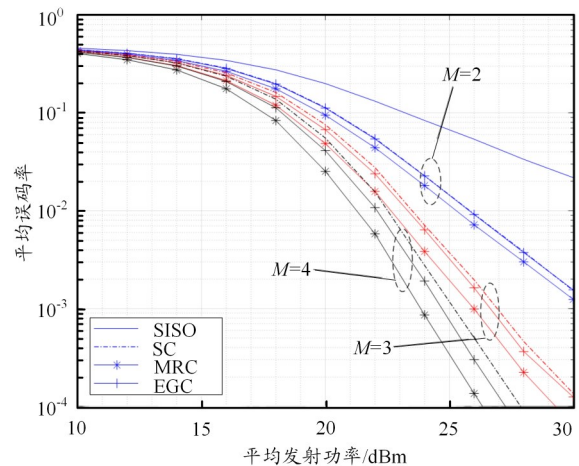


图9 弱湍流环境下,SC/MRC/EGC分集

SIMO-UWOC系统平均误码率随平均发射功率变化曲线

以上仿真结果表明,采用分集合并技术的SIMO-UWOC系统是缓解海洋湍流、指向误差与路径损耗等混合信道衰落影响的有效途径之一;随着接收端口数量的增加,系统性能改善效果也更为显著。此外,通过减小抖动标准差(提升收发机间的稳定性)或增大接收机孔径等方式,同样能够有效降低系统平均误码率,从而进一步抑制混合衰落对系统性能的负面影响。

3 结束语

本文建立了一个综合考虑GGD海洋湍流、零视轴指向误差及Elamassie路径损耗等复杂因素的完备且准确的UWOC混合衰落信道模型,主要研究了在此信道模型下,采用SC分集的SIMO-UWOC系统的平均误码率性能。理论分析与计算机数值仿真结果表明:相比于传统SISO-UWOC系统,采用SC分集的SIMO-UWOC系统能有效抵抗海洋混合衰落的不利影响,显著降低系统平均误码率并提升通信传输距离。同时,系统核心参数如湍流闪烁指数、接收机孔径及抖动标准差等均会对误码率性能产生较大影响。本文给出的Monte Carlo数值仿真结果与理论误码率闭型表达式推导结果完全吻合,进一步验证了所提SIMO-UWOC系统在SC分集下平均误码率理论表达式的正确性,为后续快速评估系统误码率性能提供了有效参考。

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]. Sci China Inf Sci, 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] Kannan A, Bhavana V, Younus S M, et al. Experimental demonstration and performance analysis of free space and underwater optical wireless communication systems[J]. Wireless Personal Communications, 2024, 134: 69–93.
- [4] Yi X, Ban K, Liu H, et al. Aperture-averaged angle-of-arrival fluctuations in oceanic turbulence of arbitrary strength[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(3): 2631–2640.
- [5] Jiang Y, Li Y, Zhang X, et al. Outage performance analysis for relay-assisted uwoc systems over GGD weak turbulence with nonzero boresight pointing errors[J]. Physical Communication, 2023, 58(6): 102017.
- [6] 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.
- [7] Fu J, Zhu K, Mohsan S A H, et al. Channel model and signal-detection algorithm for the combined effects of turbulence and link misalignment in underwater optical massive MIMO systems[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(3): 547–562.
- [8] Ali M F, Jayakody D N K. SIMO-underwater visible light communication(UVLC) system [J]. Computer Networks, 2023, 232: 109750.
- [9] Jiang H Y, Qiu H B, He N, et al. Ergodic capacity and error performance of spatial diversity UWOC systems over generalized gamma turbulence channels[J]. Optics Communications, 2022(505): 127476-1–127476-7.
- [10] 李岳衡,徐贻宁,居美艳,等. GGD弱湍流环境含零视轴指向误差MISO-UWOC系统容量分析[J]. 通信学报, 2023, 44(8): 111–124.
- [11] 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): 2455–2458.
- [12] 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.
- [13] Elamassie M, Miramirkhani F. Performance characterization of underwater visible light communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 543–552.
- [14] 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.
- [15] Proakis J G. Digital communications[M]. 4th edition. Boston: McGraw Hill, 2001.
- [16] Prudnikov A P, Brychkov Y A, Marichev O I. Integrals and series, vol. 3: more special functions[M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- [17] Fang X, Khalighi M A, Bourennane S. Impact of different noise sources on the performance of PIN-and APD-based FSO receivers[C]// IEEE. Proceedings of International Conference on Telecommunications. Piscataway: IEEE, 2012: 211–218.
- [18] Chiani M, Dardari D, Simon M K. New exponential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels [J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2003, 2(4): 840–845.
- [19] Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, et al. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2009, 8(2): 951–957.
- [20] Gradshteyn I S, Yzhik I M. Table of integrals, series, and products [M]. 7th edition. New York: Academic, 2007.
- [21] Mathai A M, Ram K S, Hans J, et al. The H-Function theory and application[M]. New York: Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010.
- [22] Chergui H, Benjillali M. Rician K-factor-based analysis of XLOS service probability in 5G outdoor ultra-dense networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 428–431.
- [23] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(1): 1–12.
- [24] Jamali M V, Nabavi P, Salehi J A. MIMO underwater visible light communications: comprehensive channel study, performance analysis, and multiple-symbol detection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8223–8237.
- [25] 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.