



研究与开发

## 衰落环境下 SIMO-UWOC 系统误码性能分析

朱家彬, 李岳衡, 王炜杰

(河海大学信息科学与工程学院, 江苏 常州 213200)

**摘要:** 基于海洋湍流衰落环境, 考虑一个由广义伽马分布 (generalized Gamma distribution, GGD) 海洋湍流效应、零视轴指向误差以及路径损耗组成的混合衰落信道模型。利用 Meijer-G 函数推导出该模型下采用选择式合并 (selection combining, SC) 下的单输入多输出 (single input multiple output, SIMO) 水下无线光通信 (underwater wireless optical communication, UWOC) 系统下的平均误码率, 通过蒙特卡洛仿真验证准确性。仿真结果表明: SIMO 系统中 SC 的性能优于 SISO 系统的性能; 相同平均误码率下, SIMO 系统的传输距离也优于 SISO 系统的传输距离。

**关键词:** 广义伽马分布; 海洋湍流; 指向误差; 水下无线光通信

**中图分类号:** TN929

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025133

## Bit error rate performance analysis of SIMO-UWOC systems in fading environments

ZHU Jiabin, LI Yueheng, WANG Weijie

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

**Abstract:** In the marine turbulence fading environment, a hybrid fading channel model was considered, which included the effects of generalized Gamma distribution (GGD) marine turbulence, zero-mean axis pointing errors, and path loss. Using the Meijer-G function, the average bit error rate for a single-input multiple-output (SIMO) underwater wireless optical communication (UWOC) system employing selection combining (SC) was derived. Finally, the accuracy of the derived expression was validated through Monte Carlo simulations. The results show that the performance of SC in the SIMO system outperforms that of the SISO system. Additionally, for the same average bit error rate, the transmission distance of the SIMO system is also superior to that of the SISO system.

**Key words:** generalized Gamma distribution, marine turbulence, pointing error, underwater wireless optical communication

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-05-12

通信作者: 李岳衡, yueheng\_li@hhu.edu.cn



## 0 引言

由于大量未开发的海底资源将是短缺的陆地资源的良好补充<sup>[1]</sup>，水下勘探一直是世界各地研究人员的一个研究重点，水下无线光通信（underwater wireless optical communication, UWOC）变得愈发重要。海水中悬浮粒子（如水溶性盐和矿物质）的散射和吸收效应<sup>[2]</sup>以及温度变化会产生水下光学湍流<sup>[3]</sup>，准确地描述UOWC信道和优化信道利用率非常重要。

本文采用单输入多输出（single-input multiple-output, SIMO）分集系统，准确表述UWOC信道并优化信道的利用率。文献[4]采用对数正态分布，基于发光二极管（light emitting diode, LED）源和多探测器的SIMO方案来缓解深度衰落；文献[5]研究了在伽马-伽马<sup>[6]</sup>衰落信道下的等增益组合的遍历容量和误码率性能。文献[7]在考虑气泡水平和水质差异影响的前提下，研究了单输入多输出-水下光通信（SIMO-UWOC）系统在指数-广义伽马（exponential-generalized Gamma, EGG）湍流信道下的误码率。文献[8]研究了在强湍流和接收器失配条件下水下可见光通信（underwater visible light communication, SIMO-UVLC）系统的误码率和中断概率。文献[9]在考虑温度、盐度变化及传输距离的前提下，研究了多输入单输出（multi-input single-output, MISO）-UWOC系统在海洋湍流信道下的闪烁指数及误码率。文献[10]研究了多输入多输出（multi-input multi-output, MIMO）-UWOC系统在弱湍流信道和光束衰减影响下，采用里德-所罗门信道编码时对误码率、信号传输可靠性和数据完整性的增强作用。文献[11]分别研究了无多径效应下SIMO系统和MISO系统在可见光通信（visible light communication, VLC）中的信道容量。分析现有分集合并UWOC系统的相关研究成果不难发现，它们在复杂海洋环境湍流信道建模过程中普遍使用对数正态分布和伽

马-伽马分布来分别模拟弱海洋湍流和强海洋湍流衰落。但事实上，根据文献[12-13]给出的实验测试数据，在当前不同科研工作者提出的多种用于刻画海洋湍流衰落统计特性的概率密度函数（probability density function, PDF）模型中，基本上只有广义伽马分布（generalized Gamma distribution, GGD）模型和EGG模型能够取得实测—拟合数据与理论曲线的完美匹配。测试数据还进一步表明，在GGD和EGG这两个模型中，GGD模型尤为适合模拟海水中温度和盐度梯度所导致的弱湍流效应<sup>[12-13]</sup>。特别地，当发射激光源和接收机分别配备了光束扩展器与准直器，以及孔径平均透镜后，GGD模型也能够比较精确地拟合由包括温度和盐度梯度以及空气气泡等多种因素在内的复杂环境因素产生的“弱-中-强”湍流效应<sup>[13]</sup>。比较而言，由于EGG模型在GGD模型的基础上引入了一个带权重的指数PDF项，该混合模型其实更加适合描述存在大量气泡的“中-强”湍流环境，而且利用该EGG模型进行系统性能分析时，其分析和仿真复杂性也显著高于GGD模型<sup>[13]</sup>。比较而言，GGD模型具有更加简洁的参数表示形式和灵活度，选用GGD模型来描述各种强度的海洋湍流效应将为后续的系统核心性能指标分析带来便利。此外，关于UWOC链路的路径损耗模型，文献[14]的研究结果表明，传统Beer-Lambert简单指数模型并不能很好地拟合海洋环境中诸如海水的吸收与散射效应以及收发机之间几何损失导致的路径损耗，此种情形下文献[14]给出的Elamassie路损模型<sup>[15]</sup>才是更好的选择。除海洋湍流和水下路径损耗之外，收发平台抖动产生的发射机指向误差也是影响分集合并UWOC系统性能的关键因素之一。不过，在分集合并方案中引入指向误差会因数学上的合并处理操作而给系统理论性能分析带来很大的负担，这也正是迄今为止，有关分集合并UWOC系统中研究指向误差的相关文献数量较少的原因所在。由上述分析可知，现有

关于分集合并 UWOC 系统性能分析方面的研究工作尚有许多不够完善或者说需要改善与提升之处，这正是本文的研究内容。

为此，本文根据文献[12-13]的数据，针对海洋湍流（弱湍流、中强湍流和强湍流）环境采用 GGD 分布下含指向误差的混合衰落信道模型，推导并分析 SISO 和 SIMO-UWOC 系统中 SC 的平均误码率表达，通过数值仿真验证理论推导结果的准确性，并进行误码性能分析。

## 1 系统模型

### 1.1 混合衰落接收信道模型

本文研究一种发射端只有单个发射机，接收端配置有多个接收机的 SIMO-UWOC 系统，图 1 展示了 SIMO-UWOC 系统结构。假设  $M$  个接收机均匀分布在  $XOY$  平面内的圆周上，发射光源位于垂直于该圆面圆心的直线上，发射光源节点（source node, SN）与接收目标节点（destination node, DN）之间的距离设为  $d$ ，视场角为  $\theta_{FoV}$ 。

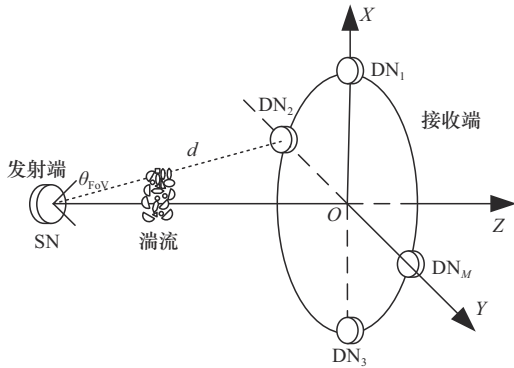


图 1 SIMO-UWOC 系统结构

### 1.2 混合衰落信道系数 PDF 和 CDF 的推导

本文考虑一个由 GGD 海洋湍流效应、零视轴指向误差以及路径损耗组成的混合衰落信道模型，当可见光信号通过水下该混合衰落信道进行传播时，接收机所能接收到的信号光强度可表示为：

$$I_r = I_t h_1 h \quad (1)$$

其中， $I_t$  为传输信号强度， $h_1$  为路径损耗， $h$  表示

混合衰落系数<sup>[16]</sup>，可以表示为：

$$h = h_p h_a \quad (2)$$

其中， $h_p$  为零视轴指向误差<sup>[16]</sup>， $h_a$  为海洋湍流效应。零视轴指向误差的 PDF 为：

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0^2} h_p^{\gamma^2 - 1}, \quad 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (3)$$

其中， $h_p = A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{zeq}^2}\right)$ ， $A_0 = [\text{erfc}(v)]^2$ ， $r$  为径

向随机抖动， $\gamma = \frac{w_{zeq}}{2\sigma_s}$ ； $w_{zeq}^2 = \frac{w_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$  为等

效光束宽度， $w_z$  为与发射光源相距  $z$  的光束宽度，

$\sigma_s$  为抖动标准差， $v = \frac{\sqrt{\pi} D_R}{\sqrt{2} w_z}$ ， $D_R$  为接收机孔径

直径，GGD 湍流效应  $h_a$  的 PDF 为：

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{c \cdot h_a^{ac-1}}{b^{ac} \Gamma(a)} \exp\left(-\left(\frac{h_a}{b}\right)^c\right), \quad h_a > 0 \text{ 且 } a, b, c > 0 \quad (4)$$

其中， $a$ 、 $c$  为形状参数， $b$  为尺度参数， $b =$

$$\frac{\Gamma(a)}{\Gamma\left(a + \frac{1}{c}\right)}, \quad \Gamma(\cdot) \text{ 为 Gamma 函数。}$$

根据文献[17]中的计算准则，可以得知：

$$f(h|h_a) = f_{h_p}\left(\frac{h}{h_a}\right) \cdot \left| \frac{\partial h_p}{\partial h} \right| = \frac{\gamma^2}{(A_0 h_a)^{\gamma^2}} h^{\gamma^2 - 1} \quad (5)$$

由此可得混合衰落信道模型的 PDF 为：

$$f_h(h) = \int_0^\infty f(h|h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a = \frac{\gamma^2 h^{\gamma^2 - 1} c}{A_0 \gamma^2 b^{ac} \Gamma(a)} \int_{\frac{h}{A_0}}^\infty h_a^{-\gamma^2 + ac - 1} \exp\left(-\left(\frac{h_a}{b}\right)^c\right) dh_a \quad (6)$$

通过文献[18]中式 8.4.3.1 和式 2.24.2.3，式 (6)

可简化为：

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



其中,  $C_1 = \frac{c\gamma^2\sqrt{k_1}}{(A_0b)^{ac}\Gamma(a)l_1(2\pi)^{\frac{k_1-1}{2}}}$ ,  $C_2 = \frac{1}{(b^c k_1)^{k_1}(A_0)^{l_1}}$ ,  $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$  为 Meijer-G 函数, 令  $l_1=c$ ,  $k_1=1$ , 式 (7) 化简得:

$$f_h(h) = C_1 h^{ac-1} G_{1,2}^{2,0} \left[ C_2 h^c \left| \begin{matrix} \gamma^2-ac+c \\ \gamma^2-ac, 0 \end{matrix} \right. \right] \quad (8)$$

复合信道衰落系数的 CDF 为:

$$F_h(h) = \int_0^h f_h(h) dh = C_1 \frac{1}{c} h^{ac} G_{2,3}^{2,1} \left[ C_2 h^c \left| \begin{matrix} 1-a, \gamma^2-ac+c \\ \gamma^2-ac, 0, -a \end{matrix} \right. \right] \quad (9)$$

## 2 混合衰落环境 SIMO-UWOC 系统 SC 分集误码性能分析

### 2.1 混合衰落 SISO-UWOC 系统平均误码率推导

在 SISO 条件下, 光电检测器的电流输出信号为:

$$r = \eta I_r + n = 2\eta P_t x h_1 h + n \quad (10)$$

其中,  $n$  是均值为 0、方差为  $\sigma^2 = \frac{4KT_1B}{R}$  的高斯热噪声,  $K$  为玻尔兹曼常数,  $T_1$  为开尔文温度,  $B$  为滤波器带宽,  $R$  为系统负载电阻值;  $P_t$  为平均发射功率;  $x$  为发射“0”“1”的开关键控 (on-off keying, OOK) 符号;  $\eta$  为光电转换系数; 路径损耗变量<sup>[19]</sup>  $h_1$  计算如下:

$$h_1 = \left( \frac{D_R}{\theta_{1/e} d} \right)^2 e^{-c_0 d \left( \frac{D_R}{\theta_{1/e} d} \right)^T} \quad (11)$$

其中,  $\theta_{1/e}$  为光束发散角,  $d$  为链路传输距离,  $c_0$  为消光系数,  $T$  为修正系数。通过计算可得总误码率为:

$$P_{eSC} = \frac{C_1^2}{6c} \int_0^\infty h_{\max}^{2ac-1} \cdot G_{2,3}^{2,1} \left[ C_2 h_{\max}^c \left| \begin{matrix} 1-a, \gamma^2-ac+c \\ \gamma^2-ac, 0, -a \end{matrix} \right. \right] \cdot G_{1,2}^{2,0} \left[ C_2 h_{\max}^c \left| \begin{matrix} \gamma^2-ac+c \\ \gamma^2-ac, 0 \end{matrix} \right. \right] e^{-C_3 \cdot h_{\max}^2} dh_{\max} + \frac{C_1^2}{2c} \int_0^\infty h_{\max}^{2ac-1} \cdot G_{2,3}^{2,1} \left[ C_2 h_{\max}^c \left| \begin{matrix} 1-a, \gamma^2-ac+c \\ \gamma^2-ac, 0, -a \end{matrix} \right. \right] \cdot G_{1,2}^{2,0} \left[ C_2 h_{\max}^c \left| \begin{matrix} \gamma^2-ac+c \\ \gamma^2-ac, 0 \end{matrix} \right. \right] e^{-C_4 \cdot h_{\max}^2} dh_{\max} \quad (16)$$

$$P_{eSISO} = p(0)p(1/0) + p(1)p(0/1) = Q \left( \frac{\eta P_t \cdot h_1 \cdot h}{\sigma} \right) \quad (12)$$

其中,  $p(0)$ 、 $p(1)$  为发射符号“0”“1”的概率,  $p(1/0)$ 、 $p(0/1)$  为发射符号“0”或“1”, 错判为“1”或“0”的条件概率,  $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} x \right)$ ,

在 GGD 湍流效应加指向误差的混合衰落信道中 OOK 传输系统的平均误码率为:

$$P_{eSISO} = \frac{C_1}{4\sqrt{\pi}} \frac{2^{-\frac{1}{2}} c^{ac/2-1} C_3^{-\frac{ac}{2}}}{(2\pi)^{\frac{c}{2}}} \cdot G_{2+c,4}^{3,c+1} \left[ \frac{C_2^2 c^c}{4C_3^c} \left| \begin{matrix} 1-\frac{a}{2}, \Delta \left( c, \frac{1-ac}{2} \right), \frac{\gamma^2-ac+2c}{2c} \\ \frac{\gamma^2-ac}{2c}, 0, \frac{1}{2}, -\frac{a}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (13)$$

其中,  $C_3 = \frac{\eta^2 P_t^2 \cdot h_1^2}{2\sigma^2}$ 。

### 2.2 混合衰落 SIMO-UWOC 系统 SC 分集下的平均误码率推导

假设源节点到各接收节点之间的距离近似相等, 则在接收端采用 SC 分集合并后的最终接收信号可以写为:

$$r = 2\eta P_t x h_1 h_{\max} + n \quad (14)$$

其中,  $h_{\max} = \max \{h_1, h_2, \dots, h_M\}$ 。

SC 系统的总误码率为  $p_{sc} = Q \left( \frac{\eta P_t h_1 \cdot h_{\max}}{\sigma} \right)$ ,

故而在 GGD 湍流效应加指向误差的混合衰落信道中 SC 系统的平均误码率为:

$$P_{eSC} = \int_0^\infty Q \left( \frac{\eta P_t h_1 \cdot h_{\max}}{\sigma} \right) f_{h_{\max}}(h_{\max}) dh_{\max} \quad (15)$$

其中,  $f_{h_{\max}}(h_{\max}) = M \cdot F_h(h_{\max})^{M-1} \cdot f_h(h_{\max})$ , 取  $M=2$  和 Q 函数近似值一起代入式 (15) 中可化简为:

根据文献[20]中式 3.326.1、式 9.301 和文献[21]式 2.3.1 中的定义 2.7 求得 SC 方案下系统的平均误码率为:

$$P_{\text{esc}2} = \frac{C_1^2}{12c \cdot C_3^{ac}} H_{0,1:2,0;2,1}^{0,1:2,0;2,1} \left[ \begin{matrix} \frac{C_2}{C_3^{\frac{c}{2}}} \\ \frac{C_2}{C_3^{\frac{c}{2}}} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} (1-ac, c/2, c/2): \left( \frac{\gamma^2-ac+c}{c}, 1 \right); (1-a, 1), \left( \frac{\gamma^2-ac+c}{c}, 1 \right) \\ -: \left( \frac{\gamma^2-ac}{c}, 1 \right), (0, 1); \left( \frac{\gamma^2-ac}{c}, 1 \right), (0, 1), (-a, 1) \end{matrix} \right] + \frac{C_1^2}{4c \cdot C_4^{ac}} H_{0,1:2,0;2,1}^{0,1:2,0;2,1} \left[ \begin{matrix} \frac{C_2}{C_4^{\frac{c}{2}}} \\ \frac{C_2}{C_4^{\frac{c}{2}}} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} (1-ac, c/2, c/2): \left( \frac{\gamma^2-ac+c}{c}, 1 \right); (1-a, 1), \left( \frac{\gamma^2-ac+c}{c}, 1 \right) \\ -: \left( \frac{\gamma^2-ac}{c}, 1 \right), (0, 1); \left( \frac{\gamma^2-ac}{c}, 1 \right), (0, 1), (-a, 1) \end{matrix} \right] \quad (17)$$

其中,  $H_{p,q;p_1,q_1;\dots;p_r,q_r}^{0,n;m_1,n_1;\dots;m_r,n_r}$  为多变量高等超越 Fox-H 函数。

### 3 数值分析

#### 3.1 仿真参数设置

本节研究推导所得的平均误码率, 验证所推导的理论闭型公式的正确性并考查不同系统核心参数对系统性能的影响, 仿真环境选取常见的近海海岸水质, 搭建一个蒙特卡洛 (Monte Carlo, MC) 数值仿真平台<sup>[22]</sup>, 吸收和散射系数根据参考文献[23]设为  $(a', b') = (0.179, 0.219)m^{-1}$ , 数值仿真主要参数见表 1<sup>[4,12-13,23]</sup>。

#### 3.2 平均误码率仿真结果与分析

本节利用 MC 数值仿真来验证所推导的 SISO、SIMO-UWOC 系统平均误码率理论表达式的正确性。

图 2~图 4 展示了不同参数情况下, SC 分集接收下 SIMO-UWOC 系统平均误码率随发射功率变化曲线。从图 2 的仿真结果可以看出, 随着

发射功率的增大, 平均误码率逐渐下降, 且下降的趋势不断增大, 相较于传统的 SISO-UWOC 系统, 采用 SC 分集合并技术的 UWOC 系统的误码性能更加优异, 并且随着闪烁指数  $\sigma_I^2$  即湍流强度的增大, 平均误码率也随之增大。以系统平均误码率为  $2.5 \times 10^{-2}$  为例, 当湍流强度  $\sigma_I^2 = 0.1074$  时, SISO 和 SC 系统的平均发射功率分别为 24 dBm 和 29.6 dBm, SC 分集合并系统的平均误码率相较于 SISO 系统降低了 23.3%。这正说明 SC 分集技术是克服信道衰落的有效方法之一。图 2 中 Fox-H 理论值和仿真值在低功率 ( $P_t \leq 12$  dBm) 时有些许误差, 这是因为文献[24]

中  $Q$  函数所取的近似值  $Q(x) \approx \frac{1}{12} e^{-\frac{x^2}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2}{3}x^2}$  所产生的误差的影响, 取低功率  $P_t = 10$  dBm, 可以看出 SC-SIMO 的平均误码率理论值为  $3.2 \times 10^{-1}$ , 仿真值为  $3.4 \times 10^{-1}$ , 其误差约为 5.9%, 这个误差在可控范围之内。当功率  $P_t > 12$  dBm 时, SC-SIMO 系统平均误码率的理论值和仿真值基本吻合。

表 1 数值仿真主要参数

传输距离 $d/m$	接收机端口 $M$	全宽发射机光束发散角 $\theta_{1/e}/(^{\circ})$	修正系数 $T$	闪烁指数 $\sigma_I^2$	光电转换系数 $\eta/(A \cdot W^{-1})$	玻尔兹曼常数 $K/(J \cdot K^{-1})$	开尔文温度 $T_1/K$	负载电阻 $R/\Omega$	滤波器带宽 $B/GHz$	GGD 模型形状参数 $c$	抖动标准差 $\sigma_s/cm$	光束宽度 $w_z/cm$	接收机位置
532	2	6	0.13	0.1074/0.5/1	0.85	$1.38 \times 10^{-23}$	290	100	1.5	3	15/20	40	深海

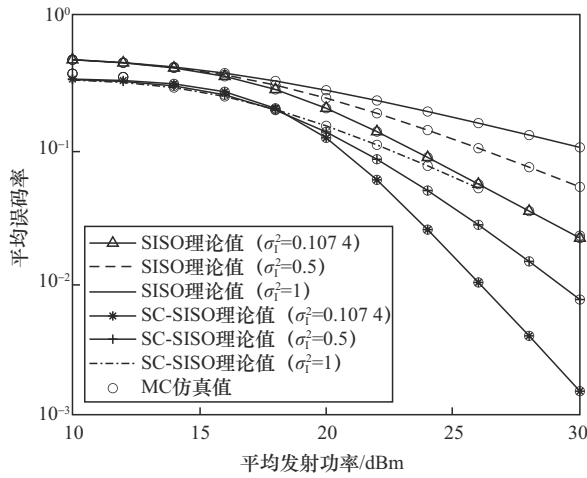


图2 SC分集接收下SIMO-UWOC系统平均误码率随发射功率变化曲线  
( $d=10\text{ m}, D_R=10\text{ cm}, \sigma_s=20\text{ cm}$ )

通过图3可知，在相同的发射功率下，保证其他参数不变，选取不同的接收机孔径  $D_R=10\text{ cm}/15\text{ cm}$ ，其仿真曲线结果表明：随着接收机孔径  $D_R$  的增大，系统的误码性能不断提高，且SC分集合并下的误码性能更加优异。以SC-SIMO系统为例，当  $P_t=30\text{ dBm}$  时，不同接收机孔径  $D_R=10\text{ cm}$  和  $D_R=15\text{ cm}$  下对应的平均误码率分别为  $4.3 \times 10^{-3}$  和  $6.6 \times 10^{-5}$ ，可见随着孔径增大系统的平均误码率降低。

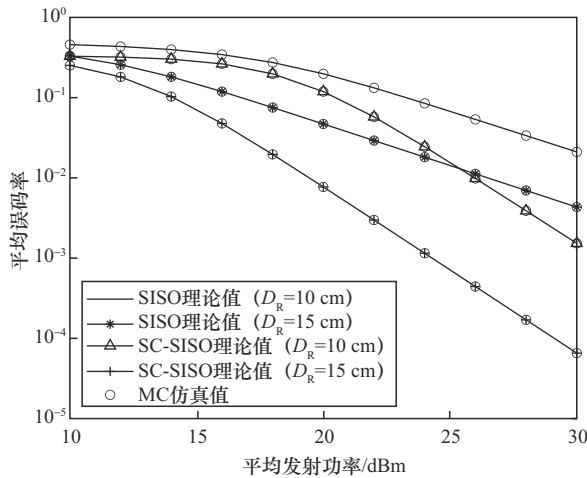


图3 SC分集接收下SIMO-UWOC系统平均误码率随发射功率变化曲线  
( $d=10\text{ m}, \sigma_1^2=0.1074, \sigma_s=20\text{ cm}$ )

图4在相同的发射功率下，保证其他参数不变，选取不同的抖动标准差  $\sigma_s=15\text{ cm}/20\text{ cm}$ ，其仿真曲线结果表明：随着抖动标准差的增加，其平均误码率增加，误码性能降低。以SC-SIMO系统为例，当  $P_t=30\text{ dBm}$  时，不同抖动离差  $\sigma_s=15\text{ cm}$  和  $\sigma_s=20\text{ cm}$  下对应的平均误码率分别为  $5.5 \times 10^{-5}$  和  $1.6 \times 10^{-3}$ ，系统的平均误码率随着抖动标准差的增加而上升。

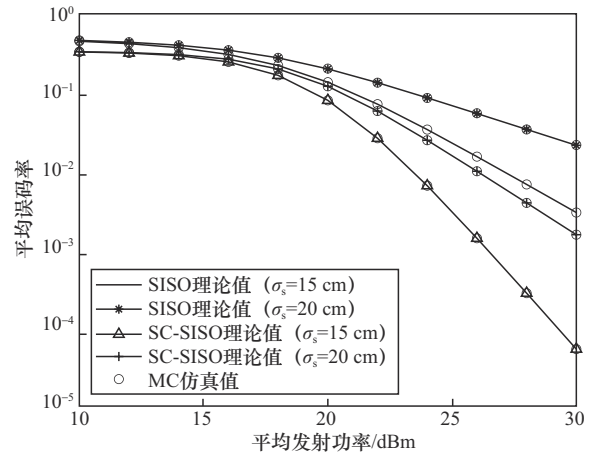


图4 SC分集接收下SIMO-UWOC系统平均误码率随发射功率变化曲线  
( $d=10\text{ m}, \sigma_1^2=0.1074, D_R=10\text{ cm}$ )

图5展示了SC分集接收下SIMO-UWOC系统平均误码率随传输距离变化曲线。由图5可知，SISO系统和SIMO系统的平均误码率随着传输距离的增加而增大，在相同的平均误码率下，SIMO系统的传输距离远优于SISO系统的传输距离，在相同的传输距离下，SC分集合并系统的误码性能优于传统的SISO系统。平均误码率为  $2 \times 10^{-2}$  时，SISO系统的传输距离为  $8\text{ m}$ ，SC-SIMO系统的传输距离为  $10.75\text{ m}$ ，其传输距离约提升  $34.38\%$ 。

以上仿真结果表明，采用分集合并技术下的SIMO-UWOC系统是缓解信道衰落的有效途径之一，通过降低抖动标准差或者增加接收机孔径等方法可以有效提高误码性能。从本节的MC仿真结果和计算结果对比来看，第2节的平均误码率

理论分析是合理的。本文的仿真测试是基于MC仿真平台进行的,虽然没有进行硬件实验,但是根据文献[25]稀疏网格的相关数据和分析,可以通过快速多重积分的方法来快速计算。

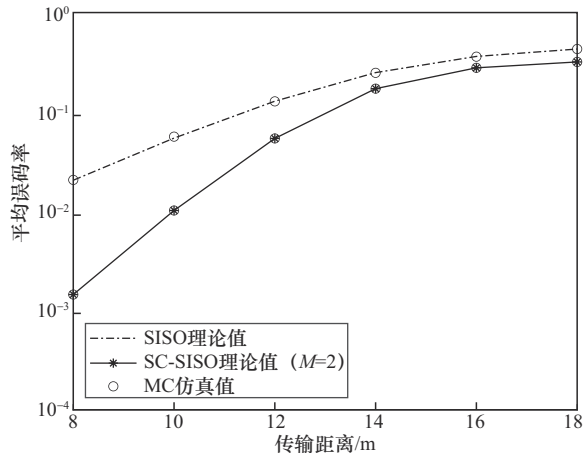


图5 SC分集接收下SIMO-UWOC系统平均误码率随传输距离变化曲线  
( $P_1=25$  W,  $\sigma_1^2=0.1074$ ,  $D_R=10$  cm,  $\sigma_s=20$  cm)

## 4 结束语

本文主要研究了一个由GGD海洋湍流效应、零视轴指向误差以及路径损耗组成的混合衰落信道模型中SISO和SIMO-UWOC系统中的误码率性能。理论分析和仿真结果显示,采用选择式合并的SIMO系统相较于SISO系统极大地降低了平均误码率,提升了系统的性能。仿真结果和理论值表明传输距离、闪烁指数、接收机半径和抖动标准差都会影响系统的平均误码率,说明SIMO系统是缓解水下光学湍流的有效途径之一。本文提供的数值仿真结果与理论数值计算结果吻合良好,可为平均误码率提供快速计算支撑。

## 参考文献:

[1] VASILESCU I, DETWEILER C, RUS D. AquaNodes: an underwater sensor network[C]//Proceedings of the Second Workshop on Underwater Networks-WuWNet '07. New York: ACM

Press, 2007: 85.

- [2] HANSON F, RADIC S. High bandwidth underwater optical communication[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 277-283.
- [3] ZEDINIE, OUBEIH M, KAMMOUNA, 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.
- [4] LIU W H, XU Z Y, YANG L Q. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence[J]. Photonics Research, 2015, 3(3): 48-53.
- [5] 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.
- [6] ANDREWS L C, PHILIPS R L, HOPEN C Y. Laser beam scintillation with applications[M]. Washington: SPIE Press, 2001.
- [7] NATH N, ANEES S. Performance analysis of SIMO-UWOC system[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [8] ALI M F, JAYAKODY D. SIMO-underwater visible light communication (UVLC) system[J]. Computer Networks, 2023, 23(8): 109750.1-109750.11
- [9] GÖKÇE M C, BAYKAL Y. Scintillation analysis of multiple-input single-output underwater optical links[J]. Applied Optics, 2016, 55(22): 6130-6136.
- [10] RAMAVATH P N, ACHARYA UDUPI S, KRISHNAN P. High-speed and reliable underwater wireless optical communication system using multiple-input multiple-output and channel coding techniques for IoUT applications[J]. Optics Communications, 2020, 461: 125229.
- [11] GONG Z Y, WU L, ZHANG Z C, et al. Capacity results for range-limited SISO and MISO dimmable VLC channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 4465-4470.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ELAMASSIE M, MIRAMIRKHANI F, UYSAL M. Performance characterization of underwater visible light commu-



- tion[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 543-552.
- [15] 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.
- [16] LIN Z R, 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.
- [17] PROAKIS J G. Digital communications[M]. 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2001.
- [18] PRUDNIKOV A P, BRYCHKOV Y A, MARICHEV O I. Integrals and series, volume 3: more special functions[M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1989.
- [19] ELAMASSIE M, MIRAMIRKHANI F, UYSAL M. Performance characterization of underwater visible light communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 543-552.
- [20] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[M]. 7th ed. San Diego: Academic Press, 2007.
- [21] MATHAIA M, SAXENA R K, HAUBOLD J. The H-function theory and application[M]. New York: Springer, 2010.
- [22] COX W C J. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [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] CHIANI M, DARDARI D, SIMON M K. New exponential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 840-845.
- [25] HEISS F, WINSCHER V. Likelihood approximation by numerical integration on sparse grids[J]. Journal of Econometrics, 2008, 144(1): 62-80.

#### [作者简介]



朱家彬 (1999-), 男, 河海大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为水下光通信。



李岳衡 (1971-), 男, 博士, 河海大学信息科学与工程学院教授, 主要研究方向为水下无线光通信、通信信号处理、人工智能与数学优化、大规模与紧凑型 MIMO 传输技术。



王炜杰 (2000-), 男, 河海大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为水下光通信。