

# GGD 弱湍流环境含零视轴指向误差 MISO-UWOC 系统容量分析

李岳衡, 徐贻宁, 居美艳, 黄平

(河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 选取广义 Gamma 分布 (GGD) 来表征弱海洋湍流, 提出了一个包含 GGD 弱湍流、零视轴指向误差、以及无衰落信道冲激响应隐路径损耗及多径效应的混合衰落信道模型。利用 Meijer-G 函数推导出采用选择性发送 (ST) 下的多入单出-水下无线光通信 (UWOC) 系统在考虑及忽略符号间干扰 (ISI) 情况下的遍历容量和中断容量数学表达, 并利用数值仿真验证上述理论推导的正确性。仿真结果表明, 相较于传统点对点传输模式, 在同等信道条件及系统参数设置下, 以发射端数  $N=2$  为例, UWOC 系统的遍历容量至少提升了 1.3 倍, 而中断容量则最大下降超过 60%; 不过, ISI 的引入将严重降低此性能改善。

**关键词:** GGD 弱湍流; 水下无线光通信; 多入单出; 指向误差; 遍历容量; 中断容量

**中图分类号:** TN929.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2023152

## Capacity analysis for MISO-UWOC systems over GGD weak turbulence with zero boresight pointing error

LI Yueheng, XU Yining, JU Meiyang, HUANG Ping

School of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China

**Abstract:** Generalized Gamma distribution (GGD) was chosen to describe the weak oceanic turbulence, and a new hybrid fading channel model that integrated the GGD weak turbulence, the zero boresight pointing error, and the implicit path loss plus multipath propagation characterized by the fading free impulse response (FFIR) was proposed. Subsequently, mathematical expressions for the ergodic capacity and outage capacity of the multiple-input single-output underwater wireless optical communication (MISO-UWOC) systems were derived through the Meijer-G function under a selective transmission (ST) diversity scheme especially while inter-symbol interference (ISI) effects were considered or not. Finally, the correctness of the theoretical formulas derived above was verified by some numerical results. The simulation results show that with the introduction of the ST diversity, the ergodic capacity of the MISO-UWOC systems, taking the transmission ports  $N=2$  as an example, is at least 1.3 times better than that of the conventional point-to-point (P2P) transmission under the same channel condition and system parameters, while the maximum outage capacity decreases is also more than 60% compared with the conventional P2P one. However, the introduction of the ISI will severely reduce this performance improvement.

**Keywords:** GGD weak turbulence, UWOC, MISO, pointing error, ergodic capacity, outage capacity

## 0 引言

近年来, 随着世界各国政府和科研团体对面向海洋环境开展的资源探索等活动的日渐重视, 研究

支持实时、高速水下多媒体通信的技术显得愈加迫切和重要。与传统的水声通信和水下射频 (RF, radio frequency) 通信相比, 水下无线光通信 (UWOC, underwater wireless optical communication) 以其大

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61832005)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61832005)

带宽、低时延、强保密性等诸多突出优点吸引了研究者的关注,并逐渐成为水下无线通信领域极具应用前景的重要研究方向之一<sup>[1-2]</sup>。

实验测试结果表明<sup>[3]</sup>,海水中溶解的大量盐和悬浮物等微粒会对水中传输的蓝/绿光束产生比较严重的吸收与散射;此外,传输路径上不同区域海水中普遍存在温度、盐度的梯度分布以及空气气泡的影响,也会导致可见光在通过这种海水时,会因反复折射引发接收光强的随机波动,产生所谓的“湍流效应”<sup>[4]</sup>,从而导致光束在水中的传输距离( $\leq 150$  m)远无法与大气环境中的传播距离相比。要解决这一问题进而有效提升 UWOC 性能的途径,一方面需采用无线中继传输技术<sup>[5]</sup>,另一方面则需采用多输入多输出(MIMO, multi-input multi-output)分集收发方案<sup>[6]</sup>。需要指出的是,鉴于水下无线光通信环境的复杂性和信道传输的独特性,现有针对陆地自由空间光通信(FSO, free-space optical)中的无线中继和分集传输<sup>[5-6]</sup>的方法和结果并不能直接应用,相应的研究,如中断概率、误码率、信道容量等衡量系统性能的关键指标仍需进行专门研究。

作为前期基础,文献[7]以纯 Monte Carlo 数值仿真的形式研究了海水中吸收与散射效应对系统误码率的影响。文献[8]研究了点对点(P2P, point-to-point) UWOC 系统在大范围光湍流模型下的系统误码率和中断概率。文献[9]则进一步研究了强、弱湍流环境中 P2P UWOC 系统的系统容量与误码率。此外,文献[10]探索并总结了 UWOC 系统采用不同先进调制技术且级联不同的后置均衡器时,接收机对传输信道非线性失真等有害因素的抑制作用。文献[11-14]则将研究对象推广到 MIMO 模式的 UWOC 系统。其中,文献[11]在考虑水质和发射机参数变化所引起的多径传播效应的前提下,分析了 MIMO-UWOC 系统采用不同合并方案时的系统误码率;文献[12-14]则分别研究了无多径效下单输入多输出(SIMO, single-input multi-output),多输入单输出(MISO, multi-input single-output)和 MIMO-UWOC 系统在弱湍流环境的平均误码性能。上述涉及湍流衰落的研究都是通过直接移植传统大气湍流模型来描述水下无线光传输环境的湍流效应的,其中弱湍流普遍采用 Lognormal 分布,强湍流采用 Gamma-Gamma 分布。然而,大量的实验测量和数据拟合实验表明,这 2 种广泛适用于陆

地大气环境的湍流模型并不能准确描述水下环境的湍流效应<sup>[4,15-16]</sup>,需根据具体的海洋环境湍流信道生成机理采用广义 Gamma 分布(GGD, generalized Gamma distribution)<sup>[15-16]</sup>或混合指数-广义 Gamma(EGG, exponential-generalized Gamma)分布<sup>[4]</sup>衰落模型来建模。另外,上述工作的研究对象仅限于点对点或点对多点的直传情形,尚未考虑支持长距离通信的工作模式。为此,文献[17-18]在考虑了无衰落冲激响应(FFIR, fading free impulse response)所引发的符号间干扰(ISI, inter-symbol interference)的条件下,分别研究了弱海洋湍流环境中串行中继和并行中继 UWOC 系统的中断概率和平均误码率性能。文献[19]分析了混合陆地-水下中继的 RF-UWOC 的两跳中继系统的中断概率、误码率和信道容量。文献[20]则分析了串行中继 UWOC 系统在采用放大-转发和解码-转发 2 种机制下系统的误码率、中断概率和遍历容量。

除了海洋湍流对 UWOC 系统性能产生影响之外,发射机指向误差<sup>[21]</sup>也会对系统性能产生重大影响。关于 UWOC 系统,分析含指向误差衰落因素的系统性能方面的文章相对较少,文献[22-23]分别研究了零视轴指向误差下 P2P 和 MIMO UWOC 系统的信道容量与误码率问题。陆地大气环境的 FSO 系统中,关于指向误差对系统影响的研究比较多,如文献[24-25]等。但表征 UWOC 系统信道衰落的模型与 FSO 的差异很大,加之海水散射导致的多径效应,需单独针对 UWOC 系统进行建模并分析其系统性能。如前文所述,考虑 MIMO 合并技术的 UWOC 系统可以有效抵抗海洋环境中路径损耗和湍流效应对系统造成的不利影响。但是,首先,众多已有研究在建模水下湍流效应时采用的数学模型不合理;其次,未考虑 FFIR 时延扩展导致的 ISI 和指向误差等不利因素。另外,调研显示,有关 MISO-UWOC 系统在复杂聚合信道模型下的遍历容量和中断容量方面的研究,在公开文献中尚未涉及,因此研究这个问题是新颖且必要的。

本文特别针对弱海洋湍流环境含零视轴指向误差 MISO-UWOC 系统的系统容量性能进行开创性研究。本文主要的创新性工作和贡献总结如下。

1) 不同于上述分析弱湍流环境 UWOC 系统性能的文献<sup>[8-9,11-14,17,22-23]</sup>,本文根据实验室测试数据<sup>[15-16]</sup>采用简单 GGD 来建模 UWOC 系统经历的

弱湍流效应,以期更加合理地分析相应的湍流环境 UWOC 系统性能。

2) 建模一种综合考虑了 FFIR 隐路径损耗和多径效应、GGD 弱湍流,以及零视轴指向误差的新的聚合衰落接收信道模型。利用高等超越 Meijer-G 函数推导出考虑了 GGD 弱湍流以及零视轴指向误差的混合衰落联合概率密度函数 (PDF, probability density function); 基于此,分别推导出在考虑和忽略 ISI 情形下,聚合衰落 MISO-UWOC 系统遍历容量和中断容量的理论表达式。

3) 利用 Monte Carlo 数值仿真验证上述推导所得 MISO-UWOC 系统遍历容量和中断容量理论表达式的准确性,并考察了不同系统核心参数对系统性能的影响。

## 1 系统模型

### 1.1 混合衰落接收信号模型与匹配滤波

本文研究一种发射端具有多个光波束、接收端只有单个接收机的 MISO-UWOC 系统,其结构如图 1 所示。假设  $N$  个发射光源均匀分布在  $X$ - $Y$  平面内半径为  $r_f$  的圆周上,其坐标为  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1,2,\dots,N$ ,接收机位于  $Z$  轴上距离坐标原点  $z_0$  处,则由空间几何关系可以计算出各发射源节点 (SN, source node) 至目标节点 (DN, destination node) 之间的传输距离  $d_i$ 。不失一般性,发射端采用 Gauss 波束激光源,其  $z=0$  即  $X$ - $Y$  平面内的 Gauss 光束的归一化空间电场强度衰减特性服从经典 Gauss 函数  $\exp\left(\frac{-r^2}{W_b^2}\right)$ <sup>[26]</sup>,其中,  $r$  为  $X$ - $Y$  平面内垂直于  $Z$  轴的径向距离,  $W_b$  为光束宽度或光束腰。节点  $SN_i$  发射的激光束经过长度为  $d_i$  的湍流信道后被接收端 DN 接收,其接收半径为  $r_a$ 、视场角 (FoV, field of view) 为  $\theta_{FoV}$ 。

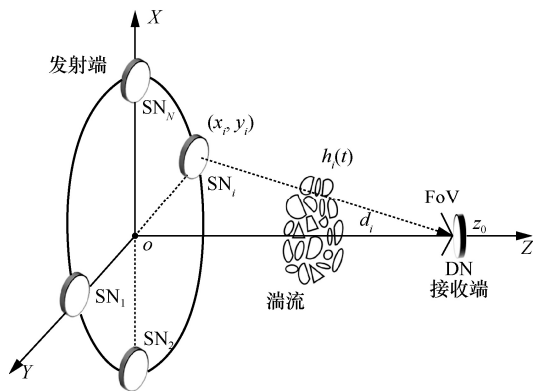


图 1 MISO-UWOC 系统结构

在图 1 所示的 MISO-UWOC 系统中,各个源节点 SN 将原始电信号转换为光信号,通过水下无线光信道传输至接收机即 DN,最后经合并处理后再转换为电流信号。由第  $i$  个 SN 传输至 DN 的电流信号可以表示为<sup>[27]</sup>

$$r_i(t) = Rg_i(t) + n_i(t), \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

其中,  $R = \frac{\eta q}{hf}$  为光电检测器的转换系数,  $\eta$ 、 $q$ 、 $h$ 、 $f$  分别表示量子效率、电子电荷、普朗克常数和水下光波的频率,  $f = \frac{c_0}{\lambda}$ ,  $c_0$  为水下光波的传输速率,

$\lambda$  为光波长 (可见光波长的大小与光电转换系数成正比);  $n_i(t)$  为第  $i$  条支路的接收机加性白高斯噪声随机过程,其任一采样点信号是均值为 0、方差为

$$\sigma_{T_b}^2 = \frac{4KTB}{R_L}$$

的高斯随机变量,  $K$ 、 $T$ 、 $B$ 、 $R_L$  分别表示玻尔兹曼常数、开尔文温度、滤波器带宽、系统负载电阻值;  $g_i(t)$  为由第  $i$  个节点  $SN_i$  发射的,经历了弱海洋湍流、零视轴指向误差以及 FFIR 隐路径损耗和多径效应等综合衰落因素影响的接收光电电流信号,其数学表达式为

$$g_i(t) = T_s C_g s(t) * h_i(t) \quad (2)$$

其中,  $T_s$  为接收端滤波器的增益,  $C_g$  为聚光器的增益,为简化后续公式的推导与分析,将这 2 个参数

设为 1;  $s(t)$  为传送的数据序列  $\sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k P(t - kT_b)$ ,

$b_k \in \{0, 1\}$  为第  $k$  个时间间隔发送的开关键控 (OOK, on-off keying) 码元,  $P(t) = 2P_b M(t)$  为在符号间隔

$[0, T_b]$  上的脉冲成形函数,  $P_b$  为平均发射功率,  $M(t)$  为对应的单位值门函数;  $h_i(t) = h_i h_0^i(t)$  为混合信道冲

激响应,  $h_i$  为第  $i$  条信道的混合衰落系数,  $h_0^i(t)$  为对应路径的 FFIR;  $*$  为卷积算子。由此,  $g_i(t)$  可进一步表示为

$$g_i(t) = h_i \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k \Gamma_i(t - kT_b) \quad (3)$$

其中,  $\Gamma_i(t) = P(t) * h_0^i(t)$  表示脉冲成形函数  $P(t)$  通过 FFIR 信道  $h_0^i(t)$  后隐性体现波形多径传输效应

(即引入了 ISI) 与路径损耗的卷积输出接收波形。

由于本文考虑的混合衰落信道模型包含了弱海洋湍流、零视轴指向误差,以及 FFIR 路径损耗和多径效应,其中,路径损耗与多径效应以隐性的形式体现在 FFIR 函数之中,因此在混合衰落系数  $h_i$  的

数学描述上, 只需考虑湍流效应和指向误差即可,  $h_i$  可以表示为<sup>[21]</sup>

$$h_i = h_i^a h_i^p \quad (4)$$

其中,  $h_i^a$  为弱海洋湍流衰落,  $h_i^p$  为零视轴指向误差。

大量的实验测试数据表明<sup>[4,15-16]</sup>, 在现有用于描述海洋湍流衰落统计特性的 PDF 模型中, GGD 和 EGG 皆能取得湍流信道实测数据与理论曲线之间的最佳拟合。其中, GGD 模型特别适合于模拟海水中由温度和盐度的梯度而导致的弱湍流效应<sup>[15-16]</sup>。当激光源配置光束扩展和准直器 (BEC, beam expander-and-collimator)、接收端配置孔径平均透镜 (AAL, aperture averaging len) 时, GGD 模型对光束所经历的由温度、盐度梯度, 以及气泡等混合因素导致的弱-中-强湍流效应, 也能取得非常准确的拟合效果<sup>[16]</sup>。混合 EGG 模型<sup>[4]</sup>因为相较于三参数 GGD 模型提供了额外 2 个自由度的待优化拟合系数, 故更适用于模拟海水中存在大量气泡的中-强湍流信道<sup>[16]</sup>。此外, 由于 EGG 模型相较于 GGD 模型增加了一个带权重项的指数 PDF 项, 基于该混合 PDF 模型进行有关 UWOC 系统性能分析和数值仿真都将远比 GGD 模型复杂。基于上述分析, 本文采用 GGD 模型来描述由温度与盐度变化导致的弱海洋湍流效应, 以期获取更加复杂通信环境下系统性能的闭形表达, 或者同等复杂环境下相对简单的性能描述。满足 GGD 模型的弱海洋湍流衰落  $h_i^a$  的 PDF 表达式为

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

式(5)满足  $h_i^a > 0$  且  $a, b, c > 0$ , 其中,  $b$  为尺度参数,  $a$  和  $c$  为形状参数,  $\Gamma(\cdot)$  为伽玛函数。定义湍流闪烁指数  $\sigma_i^2$  为接收光强的归一化方差<sup>[16]</sup>, 由归一化理论和  $E[h_i^a] = 1$  约束条件, 可得 GGD 模型中 3 个参数与  $\sigma_i^2$  之间的关系为

$$\sigma_i^2 = \frac{\Gamma(a)\Gamma\left(a + \frac{2}{c}\right)}{\Gamma^2\left(a + \frac{1}{c}\right)} - 1 \quad (6)$$

$$b = \frac{\Gamma(a)}{\Gamma\left(a + \frac{1}{c}\right)} \quad (7)$$

根据式(6)和式(7), 本文后续仿真通过预先确定

表征湍流强度大小的闪烁指数  $\sigma_i^2$  和固定形状参数  $c$  值的方式, 来最终确定 GGD 模型的 3 个参数。

零视轴指向误差  $h_i^p$  则用来表示距离激光源垂直距离为  $z$  处的, 因洋流等因素所导致的原对准的收发机之间产生的径向随机抖动  $r$  对接收信号的损耗, 其数学描述可近似表示为<sup>[21]</sup>

$$h_i^p(r; z) \approx A_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w_{zeq}^2}\right) \quad (8)$$

其中,  $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$  为接收机于探测器中心即  $r = 0$  处所收集到的激光束功率的比值;

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

收机孔径  $r_a$  与光束宽度  $w_z$  的比值,  $\text{erf}(\cdot)$  为误差函数。不失一般性, 假设径向位移  $r$  服从瑞利分布, 则  $h_i^p$  的 PDF 可经随机变量  $r$  的函数的 PDF 的变换求解方法计算得到, 即<sup>[21]</sup>

$$f_{h_i^p}(h_i^p) = \frac{\eta^2}{A_0} (h_i^p)^{\eta^2-1}, 0 \leq h_i^p \leq A_0 \quad (9)$$

其中,  $\eta = \frac{w_{zeq}}{2\sigma_s}$ ,  $\sigma_s$  为接收机的抖动离差。

为了分析简单, 本文仅考虑对匹配滤波接收的信号进行直接检测。根据匹配滤波的基本原理<sup>[28]</sup>, 第  $i$  条支路接收的, 考虑了 FFIR 引起的符号间干扰的、第 0 时隙间隔上的积分电流可以表示为<sup>[8]</sup>

$$y_{b_0}^i = \int_0^{T_b} y_i(t) M(t) dt = b_0 h_i u_i^{(s)} + h_i \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(t,k)} + n_i \quad (10)$$

其中,  $b_0$  为 0 时隙发送的 OOK 符号;  $u_i^{(s)} = R \int_0^{T_b} \Gamma_i(t) dt$  为第  $i$  条支路上所需电流波形信号的匹配滤波器输出,  $T_b$  为 OOK 符号宽度;  $u_i^{(t,k)} = R \int_{-kT_b}^{-(k-1)T_b} \Gamma_i(t) dt$  为支路  $i$  上由信道时间弥散导致的 ISI;  $L_i$  为对应支路  $i$  的信道记忆长度, 与 ISI 有关;  $n_i$  为积分电流噪声, 其均值为 0, 方差为  $\sigma_{T_b}^2 = T_b \sigma_b^2$ 。

### 1.2 混合衰落信道 PDF 的推导

对于上述综合考虑了 GGD 弱湍流和零视轴指向误差的水下无线光信道混合衰落  $h_i$ , 即式(4), 可以得到其 PDF 表达式为

$$f_{h_i}(h_i) = \int_0^\infty f_{h_i|h_i^a}(h_i|h_i^a) f_{h_i^a}(h_i^a) dh_i^a \quad (11)$$

其中,  $f_{h_i|h_i^a}(h_i|h_i^a)$  表示在假设湍流衰落  $h_i^a$  已知情形下的条件 PDF。根据式(4)和随机变量函数 PDF 的 Jacobi 变换求解准则<sup>[28]</sup>, 该条件 PDF 可求解如下

$$f_{h_i|h_i^a}(h_i|h_i^a) = f_{h_i^p}(h_i^p) \Big|_{h_i^p = \frac{h_i}{h_i^a}} \frac{\partial h_i^p}{\partial h_i} = \frac{\eta^2}{(h_i^a A_0)^{\eta^2}} (h_i)^{\eta^2-1}, 0 \leq h_i \leq h_i^a A_0 \quad (12)$$

将式(5)和式(12)代入式(11), 可得  $h_i$  的 PDF 为

$$f_{h_i}(h_i) = \int_{\frac{h_i}{A_0}}^\infty \frac{\eta^2 h_i^{\eta^2-1}}{(h_i^a A_0)^{\eta^2}} \frac{c(h_i^a)^{ac-1}}{b^{ac} \Gamma(a)} \exp\left[-\left(\frac{h_i^a}{b}\right)^c\right] dh_i^a \quad (13)$$

利用恒等表达式  $\exp(-x) = G_{0,1}^{1,0}[x \mid_0]$  (文献[29]中式(8.4.3.1)), 式(13)可进一步写为

$$f_{h_i}(h_i) = \frac{c\eta^2 h_i^{\eta^2-1}}{A_0^{\eta^2} b^{ac} \Gamma(a)} \int_{\frac{h_i}{A_0}}^\infty (h_i^a)^{ac-\eta^2-1} G_{0,1}^{1,0}\left[\left(\frac{h_i^a}{b}\right)^c \mid_0\right] dh_i^a \quad (14)$$

其中,  $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$  为 Meijer-G 函数。再利用定积分式(文献[29]中式(2.24.2.3)), 经推导并简化后可得

$$f_{h_i}(h_i) = C_1 h_i^{ac-1} G_{l_1, k_1+l_1}^{k_1+l_1, 0}\left[C_2 h_i^{l_1} \left| \begin{matrix} \mathcal{A}(l_1, 1-ac+\eta^2) \\ \mathcal{A}(l_1, \eta^2-ac), \mathcal{A}(k_1, 0) \end{matrix} \right. \right] \quad (15)$$

其中,  $\mathcal{A}(k, a) = \left(\frac{a}{k}, \frac{a+1}{k}, \dots, \frac{a+k-1}{k}\right)$  为  $k$  维矢量;

符号  $C_1 = \frac{c\eta^2}{(A_0 b)^{ac} \Gamma(a)} \frac{\sqrt{k_1}}{l_1 (2\pi)^{\frac{k_1-1}{2}}}$ ,  $C_2 = \frac{1}{(b^c k_1)^{k_1} (A_0)^{l_1}}$ ;

$\frac{l_1}{k_1} = c$ , 即  $l_1$  和  $k_1$  的值由 GGD 的形状参数  $c$  决定。

不失一般性, 为减少 Meijer-G 函数的计算量, 本文设  $k_1 = 1$ , 则  $l_1 = c$ 。事实上, 根据 Meijer-G 函数的降阶特性<sup>[29]</sup>, 只要保证  $\frac{l_1}{k_1}$  的比值一定, 最后的计算结果就不受具体  $l_1$  和  $k_1$  取值的影响。

## 2 混合衰落环境 MISO-UWOC 系统遍历与中断容量分析

### 2.1 混合衰落 MISO-UWOC 系统遍历容量公式推导

针对图 1 所示的 MISO-UWOC 系统, 假设采用选择性发送方案, 即在发射端选择具有最大链路接收信干噪比  $\gamma = \max\{\gamma_1, \dots, \gamma_N\}$  的支路来传输信号。不失一般性, 当各条传输支路之间存在较大的空间间隔时, 完全可以假设各支路之间的信道衰落满足相互独立的传输特性, 此时该系统的接收信干噪比的累积分布函数 (CDF, cumulative density function) 可表示为

$$F_\gamma(\gamma) = \Pr\{\max\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N\} \leq \gamma\} = \Pr\{\gamma_1 \leq \gamma, \gamma_2 \leq \gamma, \dots, \gamma_N \leq \gamma\} = \prod_{i=1}^N F_{\gamma_i}(\gamma) \quad (16)$$

根据经典 P2P 香农信道容量计算式<sup>[30]</sup>, 采用选择性发送 (ST, selective transmission) 方案的 MISO-UWOC 系统的平均遍历容量为

$$C = E[\text{lb}(1 + \gamma)] = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \ln(1 + \gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \ln(1 + \gamma) dF_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_\gamma(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - \prod_{i=1}^N F_{\gamma_i}(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma \quad (17)$$

鉴于本文所分析的 MISO-UWOC 系统考虑了多径传播效应, 因而需根据 Monte Carlo 数值仿真模拟的信道传输环境, 分别在考虑以及忽略 ISI 这 2 种情形下, 对式(17)所表述的系统平均遍历容量具体数学表达进行讨论。

#### 2.1.1 考虑 ISI 的情形

由式(10)可以得出, 对应第  $i$  条支路的接收电流信号的信干噪比的表达式为<sup>[8]</sup>

$$\gamma_i = \frac{[h_i u_i^{(s)}]^2}{\left[h_i \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(j,k)}\right]^2 + \sigma_{T_b}^{\prime 2}} \quad (18)$$

由此可得  $h_i = \frac{\gamma_i \sigma_{T_b}^{\prime 2}}{\sqrt{[u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[\sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(j,k)}\right]^2}}$ ,

$$\frac{\partial h_i}{\partial \gamma_i} = \frac{\sigma'_{T_b} [u_i^{(s)}]^2}{2\sqrt{\gamma_i} \left\{ [u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[ \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(I,k)} \right]^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}$$

分析遍历容量的表达式(17)可以看出, 计算信干噪比  $\gamma_i$  的 CDF 函数  $F_{\gamma_i}(\gamma)$  是求解整个遍历容量的前提。而上文已经推导出  $h_i$  和  $\gamma_i$  的关系以及  $h_i$  的 PDF, 此时借助 Jacobi 变换准则可以求得第  $i$  条支路信干噪比的 PDF 为

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = f_{h_i}(h_i) \Big|_{h_i=f(\gamma_i)} \left| \frac{\partial h_i}{\partial \gamma_i} \right| = \frac{C_1 \sigma'^{ac}_{T_b} [u_i^{(s)}]^2 \gamma_i^{\frac{ac}{2}-1}}{2 \left\{ [u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[ \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(I,k)} \right]^2 \right\}^{1+\frac{ac}{2}}} \cdot \left[ C_2 \sigma'^{l_i}_{T_b} \left\{ \frac{\gamma_i}{[u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[ \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(I,k)} \right]^2} \right\}^{\frac{l_i}{2}} \right] \mathcal{A}(l_i, 1-ac+\eta^2) \mathcal{A}(l_i, \eta^2-ac), \mathcal{A}(k_i, 0) \quad (19)$$

则其 CDF 可以进一步表示为

$$F_{\gamma_i}(\gamma) = \frac{C_1 \sigma'^{ac}_{T_b} [u_i^{(s)}]^2}{2} \int_0^\gamma \frac{\gamma_i^{\frac{ac}{2}-1}}{\left\{ [u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[ \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(I,k)} \right]^2 \right\}^{1+\frac{ac}{2}}} \cdot \left[ C_2 \sigma'^{l_i}_{T_b} \left\{ \frac{\gamma_i}{[u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[ \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(I,k)} \right]^2} \right\}^{\frac{l_i}{2}} \right] \mathcal{A}(l_i, 1-ac+\eta^2) \mathcal{A}(l_i, \eta^2-ac), \mathcal{A}(k_i, 0) \Big] d\gamma_i \quad (20)$$

式(20)中的被积函数项  $\gamma_i$  包含在 Meijer-G 函数自变量有理式的分子与分母中, 导致该复杂积分无法得到闭型表达, 只能以数值积分的形式进行近似计算。将式(20)代入遍历容量的计算式(17), 即可得出考虑 ISI 情形, 即强 ISI 环境下的遍历容量数值计算结果。

### 2.1.2 忽略 ISI 的情形

当信道条件比较理想<sup>[31]</sup>, 如收发机位于清澈海洋或者近海海岸水质, 光源采用高斯平行激光源(即光束的初始发散角非常小), 且符号传输速率比较高(大于或等于数百兆比特每秒)的情形下, 无衰落信道冲激响应所引入的符号间干扰完全可以忽略, 原考虑 ISI 的多径传输信道将退化为简单的频率非选择性衰落(即平坦衰落)模式<sup>[28]</sup>, 此时式(10)中的干扰项  $h_i \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(I,k)} \approx 0$ , 其对应第  $i$  条支路的信干噪比则可简化为

$$\gamma_i = \frac{[h_i u_i^{(s)}]^2}{\sigma'^2_{T_b}} \quad (21)$$

显然  $h_i = \frac{\sigma'_{T_b} \sqrt{\gamma_i}}{u_i^{(s)}}$ ,  $\frac{\partial h_i}{\partial \gamma_i} = \frac{\sigma'_{T_b}}{2\sqrt{\gamma_i} u_i^{(s)}}$ 。此时, 第  $i$  条支路信干噪比  $\gamma_i$  的 PDF 可简化为

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = f_{h_i}(h_i) \Big|_{h_i=f(\gamma_i)} \left| \frac{\partial h_i}{\partial \gamma_i} \right| = \frac{C_1}{2} \left[ \frac{\sigma'_{T_b}}{u_i^{(s)}} \right]^{ac} \gamma_i^{\frac{ac}{2}-1} G_{l_i, k_i+l_i}^{k_i+l_i, 0} \left[ C_2 \left[ \frac{\sigma'_{T_b}}{u_i^{(s)}} \right]^{l_i} \gamma_i^{\frac{l_i}{2}} \left[ \mathcal{A}(l_i, 1-ac+\eta^2) \mathcal{A}(l_i, \eta^2-ac), \mathcal{A}(k_i, 0) \right] \right] \quad (22)$$

则信干噪比的 CDF 可以表示为

$$F_{\gamma_i}(\gamma) = \int_0^\gamma f_{\gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_i = \frac{C_1}{2} \left[ \frac{\sigma'_{T_b}}{u_i^{(s)}} \right]^{ac} \int_0^\gamma \gamma_i^{\frac{ac}{2}-1} \cdot G_{l_i, k_i+l_i}^{k_i+l_i, 0} \left[ C_2 \left[ \frac{\sigma'_{T_b}}{u_i^{(s)}} \right]^{l_i} \gamma_i^{\frac{l_i}{2}} \left[ \mathcal{A}(l_i, 1-ac+\eta^2) \mathcal{A}(l_i, \eta^2-ac), \mathcal{A}(k_i, 0) \right] \right] d\gamma_i \quad (23)$$

根据文献[29]中式(2.24.2.2), 将式(23)化简处理后可得

$$F_{\gamma_i}(\gamma) = \frac{C_1}{2} \left[ \frac{\sigma'_{T_b}}{u_i^{(s)}} \right]^{ac} \frac{2^{-\frac{1}{2}} l_i^{-1}}{(2\pi)^{\frac{k_i}{2}} \gamma^{\frac{-ac}{2}}} G_{3l_i, 2k_i+3l_i}^{2(k_i+l_i), l_i} \cdot \left[ \frac{C_2 \sigma'^{2l_i}_{T_b} \gamma^{l_i}}{[u_i^{(s)}]^{2l_i} 2^{2k_i}} \left[ \mathcal{A}\left(l_i, 1-\frac{ac}{2}\right), \mathcal{A}(2l_i, 1-ac+\eta^2) \right] \right] \mathcal{A}(2l_i, \eta^2-ac), \mathcal{A}(2k_i, 0), \mathcal{A}\left(l_i, -\frac{ac}{2}\right) \quad (24)$$

代入式(17)即可得系统在忽略 ISI 情形下的遍历容量数值计算结果。

### 2.2 混合衰落 MISO-UWOC 系统中断容量公式推导

ST 方案同样适用于系统中断容量的推导。假设各支路之间的信道衰落仍然是相互独立的, 则当系统瞬时容量  $C$  低于某一阈值  $C_{th}$  时将会发生容量中断现象, 则系统的中断容量可以根据定义表示为<sup>[32]</sup>

$$P_{out} = \Pr(C \leq C_{th}) = \Pr(\gamma \leq 2^{C_{th}} - 1) = \prod_{i=1}^N \Pr(\gamma_i \leq 2^{C_{th}} - 1) = \prod_{i=1}^N \int_0^{2^{C_{th}} - 1} f_{\gamma_i}(\gamma) d\gamma \quad (25)$$

#### 2.2.1 考虑 ISI 的情形

考虑 ISI 情形下的接收电流信号信干噪比  $\gamma_i$  的 PDF 如式(19)所示, 则分支  $i$  的 CDF 可以表示为

$$\int_0^{2^{C_{th}} - 1} f_{\gamma_i}(\gamma) d\gamma_i = \frac{C_1 \sigma_{T_b}^{lac} [u_i^{(s)}]^2}{2} \int_0^{2^{C_{th}} - 1} \frac{\gamma_i^{\frac{ac}{2} - 1}}{\left\{ [u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[ \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(l,k)} \right]^2 \right\}^{\frac{ac}{2} + 1}} \left[ C_2 \sigma_{T_b}^{l_i} \left\{ \frac{\gamma_i}{[u_i^{(s)}]^2 - \gamma_i \left[ \sum_{k=-L_i}^{-1} b_k u_i^{(l,k)} \right]^2} \right\}^{\frac{l_i}{2}} \right] \left[ \mathcal{A}(l_i, 1 - ac + \eta^2) \mathcal{A}(l_i, \eta^2 - ac), \mathcal{A}(k_i, 0) \right] d\gamma_i \quad (26)$$

与式(20)的情形相类似, 式(26)中的被积函数项  $\gamma_i$  同样包含在 Meijer-G 函数自变量有理式的分子与分母中, 导致该复杂积分无法得到相应的闭型表达, 只能以数值积分的形式进行近似计算。将式(26)代入中断容量的计算式(25), 即可得到在考虑 ISI 情形下, 即强 ISI 环境中的系统中断容量数值计算结果。

#### 2.2.2 忽略 ISI 的情形

当信道 ISI 比较弱, 也就是可以忽略 ISI 的影响时, 由式(22)的简化推导可以得到式(26)的闭型表达如下

$$\int_0^{2^{C_{th}} - 1} f_{\gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_i = \frac{C_1}{2} \left[ \frac{\sigma_{T_b}'}{u_i^{(s)}} \right]^{ac} \int_0^{2^{C_{th}} - 1} \gamma_i^{\frac{ac}{2} - 1} G_{l_i, k_i + l_i}^{k_i + l_i, 0} \left[ C_2 \left[ \frac{\sigma_{T_b}'}{u_i^{(s)}} \right]^{l_i} \gamma_i^{\frac{l_i}{2}} \left[ \mathcal{A}(l_i, 1 - ac + \eta^2) \mathcal{A}(l_i, \eta^2 - ac), \mathcal{A}(k_i, 0) \right] \right] d\gamma_i \quad (27)$$

根据文献[29]中式(2.24.2.2), 可将式(27)进一步化简为

$$\int_0^{2^{C_{th}} - 1} f_{\gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_i = \frac{C_1}{2} \left[ \frac{\sigma_{T_b}'}{u_i^{(s)}} \right]^{ac} \frac{2^{\frac{-1}{2}} l_i^{-1}}{(2\pi)^{\frac{k_i}{2}} (2^{C_{th}} - 1)^{\frac{-ac}{2}}} G_{3l_i, 2k_i + 3l_i}^{2(k_i + l_i), l_i} \left[ \frac{C_2^2 \sigma_{T_b}^{2l_i} (2^{C_{th}} - 1)^{l_i}}{[u_i^{(s)}]^{2l_i} 2^{2k_i}} \right] \left[ \mathcal{A}\left(l_i, 1 - \frac{ac}{2}\right), \mathcal{A}(2l_i, 1 - ac + \eta^2) \mathcal{A}(2l_i, \eta^2 - ac), \mathcal{A}(2k_i, 0), \mathcal{A}\left(l_i, -\frac{ac}{2}\right) \right] \quad (28)$$

将式(28)代入式(25), 即可以得出 MISO-UWOC 系统最终的闭型中断容量计算式为

$$P_{out} = \prod_{i=1}^N \frac{C_1}{2} \left[ \frac{\sigma_{T_b}'}{u_i^{(s)}} \right]^{ac} \frac{2^{\frac{-1}{2}} l_i^{-1}}{(2\pi)^{\frac{k_i}{2}} (2^{C_{th}} - 1)^{\frac{-ac}{2}}} G_{3l_i, 2k_i + 3l_i}^{2(k_i + l_i), l_i} \left[ \frac{C_2^2 \sigma_{T_b}^{2l_i} (2^{C_{th}} - 1)^{l_i}}{[u_i^{(s)}]^{2l_i} 2^{2k_i}} \right] \left[ \mathcal{A}\left(l_i, 1 - \frac{ac}{2}\right), \mathcal{A}(2l_i, 1 - ac + \eta^2) \mathcal{A}(2l_i, \eta^2 - ac), \mathcal{A}(2k_i, 0), \mathcal{A}\left(l_i, -\frac{ac}{2}\right) \right] \quad (29)$$

## 3 数值仿真与分析

### 3.1 仿真参数设置与 FFIR 示例

本文推导所得的 MISO-UWOC 系统的遍历容量和中断容量的数学表达式中, 路径损耗和多径效应以隐性的形式体现在 FFIR 函数  $h'_0(t)$  中, 即由积分器输出项  $u_i^{(s)}$  和  $u_i^{(l,k)}$  隐性表征。故需先搭建一个 Monte Carlo 数值仿真平台以获取基于准直光源的 UWOC 系统对应参数下传播链路上的 FFIR 数据, 具体的平台搭建方法和数学原理描述可参考文献[31]。不失一般性, 仿真环境模拟近海海岸水质,

其吸收和散射系数为  $(a', b') = (0.179, 0.219)m^{-1}$ <sup>[31]</sup>。基于准直激光源的用于 FFIR 模拟及数值仿真的主要参数如表 1 所示<sup>[11,15-17,27,31-32]</sup>。

表 1 FFIR 模拟及数值仿真主要参数

参数	数值
传输速率 $R_b / (\text{Gbit} \cdot \text{s}^{-1})$	1
光源波长 $\lambda / \text{nm}$	532
HG 模型非对称因子 $g$	0.924
光光束宽度 $W_b / \text{mm}$	3
透射光子总数 $N_t$	$10^{-6}$
接收机半角视场 $\theta_{\text{fov}}$	$80^\circ$
光子权重阈值 $W_{\text{th}}$	$10^{-4}$
量子效率 $\eta$	0.8
电子电荷 $q / \text{C}$	$1.6 \times 10^{-9}$
普拉克常数 $h$	$6.626 \times 10^{-34}$
水中光速 $c_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$2.266 \times 10^8$
玻尔兹曼常数 $K / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	$1.38 \times 10^{-23}$
等效开尔文温度 $T / \text{K}$	290
负载电阻 $R_L / \Omega$	100
滤波器带宽 $B / \text{GHz}$	10
闪烁指数 $\sigma_I^2$	0.107 4
GGD 模型形状参数 $c$	3
光束宽度 $w_z / \text{m}$	0.2
中断容量阈值 $C_{\text{th}} / (\text{bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1})$	10
接收机位置	深海

图 2 展示了传输距离为 13 m, 激光束发散角  $\theta$  分别为  $0.01^\circ$  和  $5^\circ$  时的 FFIR 仿真数据。从图 2 可知, 相较于 OOK 符号 1 Gbit/s 的传输速率, 即 1 ns 的符号宽度, 图 2(a)所示的光束发散角  $\theta = 0.01^\circ$  时所

对应的 FFIR 时延扩展仅约为 0.03 ns, ISI 效应基本可以忽略; 而图 2(b)所示的发散角  $\theta$  增大为  $5^\circ$  时所对应的 FFIR 时延扩展则大幅增加到 1 ns, 即引入了比较强的 ISI。这表明不同系统参数和信道条件下的 FFIR 仿真数据差异会比较大, 体现路径损耗和多径效应因素的 FFIR 对仿真性能的影响已不能忽略, 即在将 FFIR 仿真结果作为衰落系数, 并通过匹配滤波将其作用在接收信号上时, 需要考虑符号间干扰的影响。需要说明, 由于后续仿真中传输距离值有多种设置, 受篇幅的限制, 本文没有列出所有仿真距离值和发散角条件下的 FFIR 图形。此处仅以  $z = 13 \text{ m}$  为例, 针对传输条件  $\theta$  的变化对 FFIR 的影响进行了仿真示例与说明。

### 3.2 遍历容量仿真结果与分析

本节在混合衰落信道传输模型的基础上, 利用搭建的 Monte Carlo 数值仿真平台来验证所推导的 MISO-UWOC 系统遍历容量理论表达的合理性及系统核心参数对遍历容量的影响。

当 P2P 传输距离  $z = 13 \text{ m}$ 、抖动离差  $\sigma_s = 0.15 \text{ m}$ 、接收机半径  $r_a = 0.15 \text{ m}$  时, 不同源节点数  $N$  下, 系统遍历容量随发射功率的变化如图 3 所示。从图 3 可以看出, 随着源节点数的增加, 系统的遍历容量提升显著; 特别地, 当  $N = 1$  时, 系统等效为单输入单输出 (SISO, single-input single-output) 场景, 此时的遍历容量值最小, 这也说明采用 ST 传输分集技术可以显著提升 UWOC 系统的遍历容量。此外, 对比图 3(a)和图 3(b)可以发现, 随着发散角  $\theta$  的增加, 同样  $N$  值下的系统遍历容量下降明显, 这是因为多径效应引发的 ISI 降低了系统信干噪比。

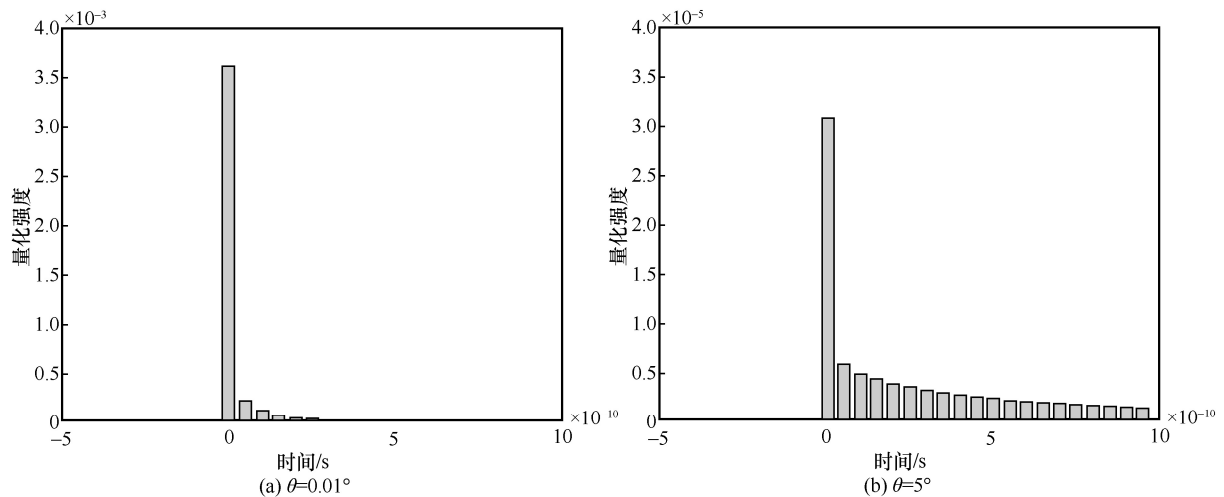


图 2 FFIR 仿真数据

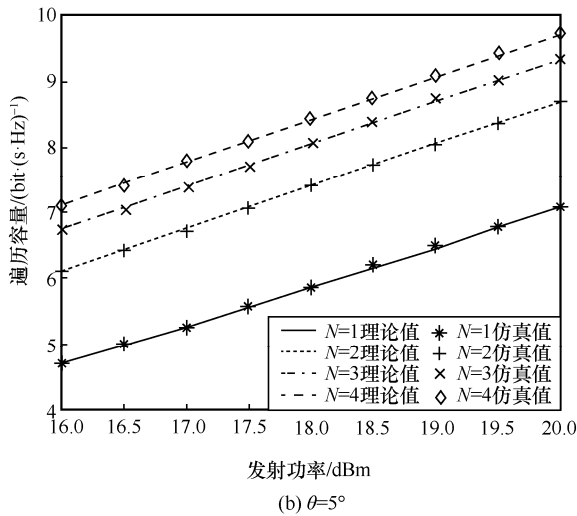
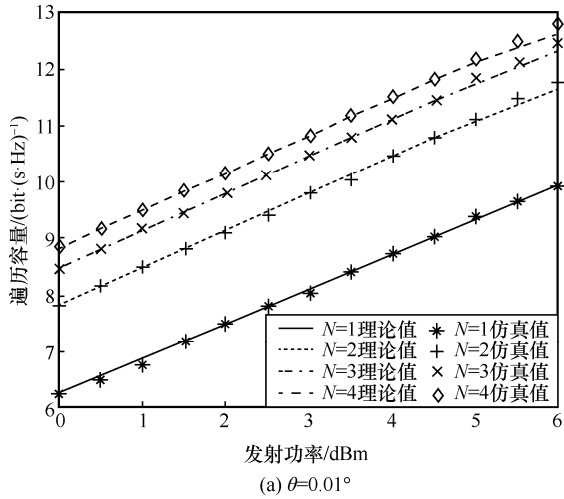


图 3 不同  $N$  下，系统遍历容量随发射功率的变化

当发射功率  $P_b = 20 \text{ dBm}$ 、 $\sigma_s = 0.15 \text{ m}$ 、 $r_a = 0.15 \text{ m}$  时，不同源节点数  $N$  下，系统遍历容量随传输距离的变化如图 4 所示。由图 4 可知，随着传输距离的逐渐增加，系统遍历容量明显下降，这是由于传输距离的增大导致了由 FFIR 表征的链路路径损耗的增强，进而使系统接收信干噪比性能恶化。此外，随着  $N$  的增加，系统遍历容量显著提升，这是因为独立衰落信道传输条件下，可供选择的传输路径增多导致可以选择具更大接收信干噪比路径。从另一个角度来看，在固定同一遍历容量值的前提下，随着源节点数  $N$  的增加，系统能够支持的传输距离更大，这也验证了分集收发技术是增加 UWOC 系统传输距离行之有效的一种方案。对比图 4(a)和图 4(b)可以看出，增大  $\theta$  引入不可忽略的 ISI 后，系统遍历容量的改善会在原有基础上有较大幅度的削减。

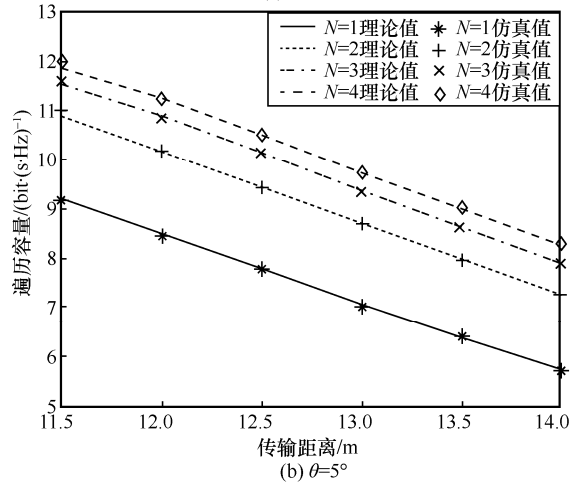
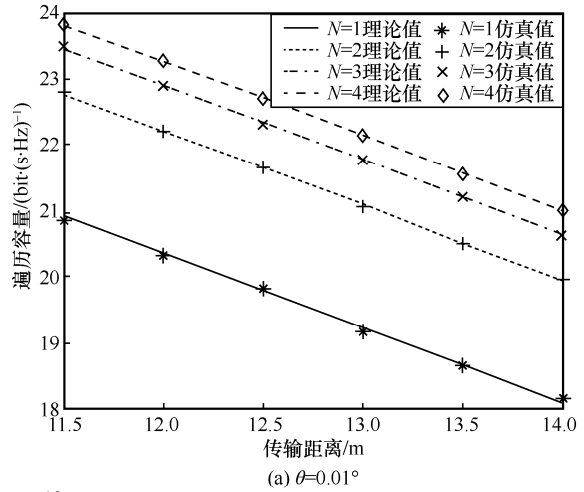


图 4 不同  $N$  下，系统遍历容量随传输距离的变化

当源节点数  $N = 3$ 、 $z = 13 \text{ m}$ 、 $r_a = 0.15 \text{ m}$  时，不同抖动离差  $\sigma_s$  下，系统遍历容量随发射功率的变化如图 5 所示。仿真结果表明，随着  $\sigma_s$  的增加，系统遍历容量下降，这是由于入射光轴发生径向抖动时，落在接收孔径中的 Gauss 光束的光强产生了由强至弱的随机变化（即引入了抖动损耗或抖动误差）。此外，由图 5(a)和图 5(b)在不同初始发散角下的性能对比可以看出，引入的 ISI 也加速了这种性能恶化，原因是不可忽略的 ISI 降低了整个系统的信干噪比。

在分别基于 GGD 和 Lognormal 海洋弱湍流模型构建的复合衰落信道中，MISO-UWOC 系统遍历容量随发射功率的变化如图 6 所示。由于 GGD 模型是建立于实测数据拟合实验所得的弱湍流模型，因此能代表混合衰落信道的准确性；Lognormal 模型则是直接移植大气环境弱湍流的不可靠模型，基于其所构建的混合衰落信道应与 GGD 存在较大差距。仿真结果证明了上述

分析,  $N=1$  即 SISO 情形下, Lognormal 模型的结果与 GGD 的差异最大, 相较于作为参考标准的 GGD 精确遍历容量值, Lognormal 模型会比较严重地高估系统遍历容量性能; 而随着参与 ST 合并的发射分集节点数的增多, 这种性能高估的趋势会逐渐减弱并反转为比较大的低估值的情形。另外, 大光源初始发散角  $\theta$  值下, 即存在比较严重的 ISI 的情形下, 在系统整体性能下降的同时, 这种反转发生得更快、也更大。这也从另一个侧面说明采用 Lognormal 模型来建模海洋弱湍流衰落是不可取的。

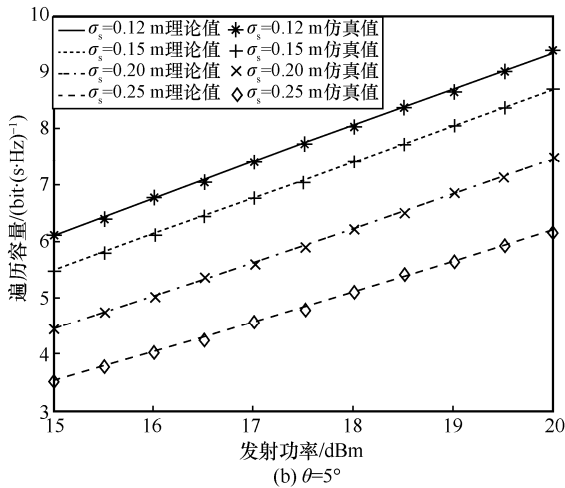
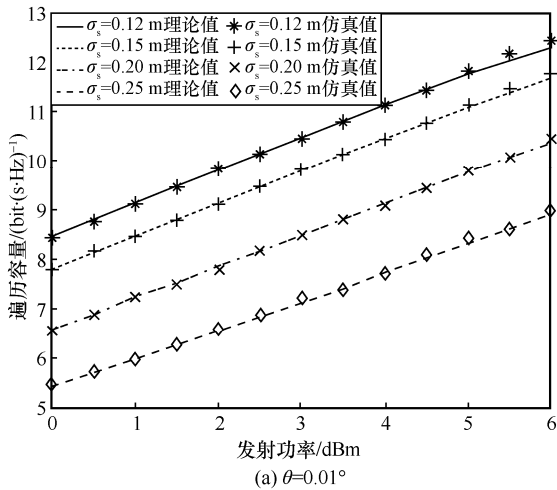


图 5 不同  $\sigma_s$  下, 系统遍历容量随发射功率的变化

此外, 上述 4 组有关遍历容量随发射功率或传输距离变化的仿真中, 还给出了模拟系统实际工作过程的遍历容量 Monte Carlo 数值仿真数据。从对比结果可以看出: 遍历容量的理论值与仿真值较为吻合, 证明了本文 2.1 节所推导的遍历容量理论表达式的准确性。

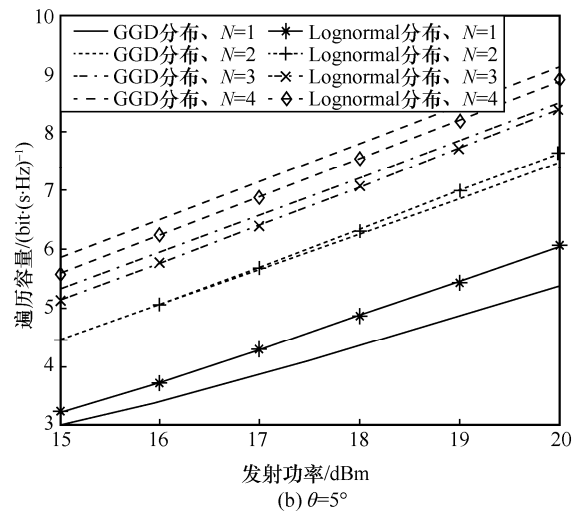
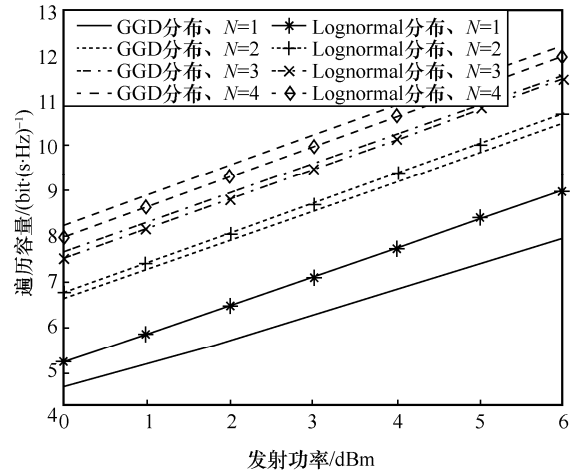


图 6 不同湍流模型下, 系统遍历容量随发射功率的变化

### 3.3 中断容量仿真结果与分析

本节继续探讨不同系统核心参数对 MISO-UWOC 系统中中断容量的影响, 并验证理论推导表达式的准确性。

固定  $z=13\text{ m}$ 、 $\sigma_s=0.15\text{ m}$ 、 $r_a=0.15\text{ m}$ , 不同源节点数  $N$  下, 系统中断容量随发射功率的变化如图 7 所示。从图 7 可以看出, 中断容量的数值随加入 ST 传输的  $N$  值的增加而迅速减小, 这说明 ST 方案下系统产生中断的风险大大降低。特别地, 当  $N=1$  时, 系统退化为 SISO, 此时系统的中断容量性能最差。这说明 ST 传输分集技术可以有效提升 UWOC 系统的中断性能。此外, 通过对比图 7(a) 与图 7(b) 还可以看出, 如果将发散角从  $\theta=0.01^\circ$  增加到  $\theta=5^\circ$ , 随着 ISI 的引入, 达到相同中断容量所需的发射功率明显增大, 说明系统需大幅度地增大发射功率才能保障所需的中断性能。

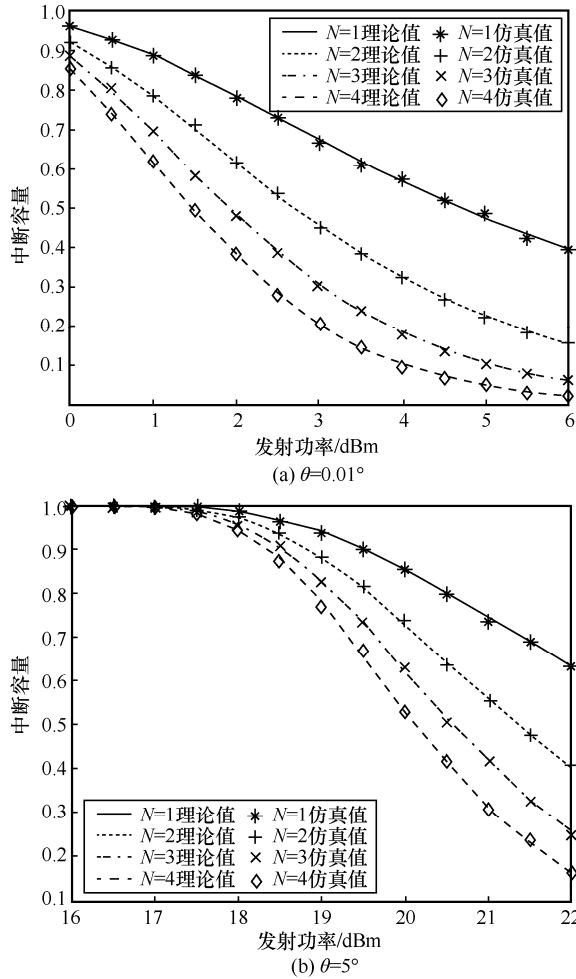


图 7 不同  $N$  下，系统中断容量随发射功率的变化

固定  $P_b = 12 \text{ dBm}$ 、 $\sigma_s = 0.15 \text{ m}$ 、 $r_a = 0.15 \text{ m}$ ，不同源节点数  $N$  下，系统中断容量随传输距离的变化如图 8 所示。从图 8 可以看出，增加  $N$  可以有效降低系统中断风险；而同样的中断容量值下，多节点的传输距离远大于单节点，这些都证明增加源节点数目可以有效增加传输距离，改善系统中断性能。至于在同样的  $N$  值下，增大传输距离将明显降低中断容量的性能的原因是随着传输距离的增加，由 FFIR 表征的水下路径损耗迅速增大，从而导致系统接收信噪比快速下降，使系统小于指定容量阈值的概率增加，即中断性能恶化。此外，对比图 8(a) 和图 8(b) 还可以看出，增加  $\theta$  引入 ISI 后，系统中断容量性能还会进一步下降。

固定  $N = 3$ 、 $z = 13 \text{ m}$ 、 $r_a = 0.15 \text{ m}$ ，不同  $\sigma_s$  下，MISO-UWOC 系统中断容量随发射功率的变化如图 9 所示。从图 9 可以看出，抖动离差  $\sigma_s$  的增大与传输距离  $z$  的增大一样会导致系统中断性能的恶化，究其原因同样是入射光轴存在抖动损耗的情形

下，接收机实际接收的光强急剧减小，进而导致接收信干噪比降低、中断容量增大。对比图 9(a) 与图 9(b) 同样可以得出，随着 ISI 的引入，中断容量性能将进一步变差，而恶化的原因就是不可忽略的 ISI 的引入迅速降低了整个系统的信干噪比。

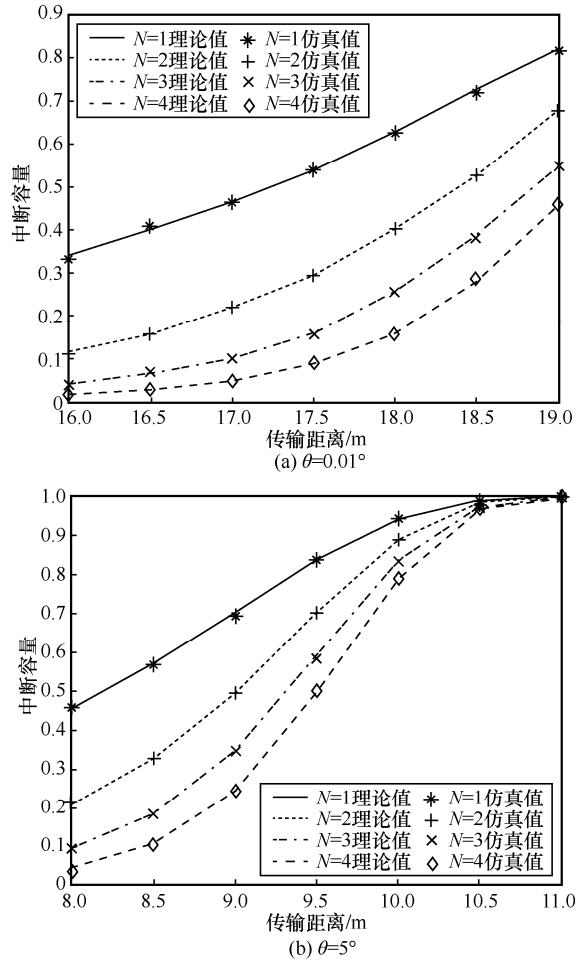


图 8 不同  $N$  下，系统中断容量随传输距离的变化

固定  $z = 13 \text{ m}$ 、 $r_a = 0.1 \text{ m}$ 、 $\sigma_s = 0.1 \text{ m}$ ，分别基于 GGD 和 Lognormal 分布来建模海洋弱湍流效应的复合衰落传输信道中，系统中断容量随发射功率的变化如图 10 所示。从图 10(a) 可以看出，初始发散角  $\theta$  较小时，与作为基准参照的 GGD 湍流模型复合衰落信道的 MISO-UWOC 系统的中断容量相比，尤其是在小发射功率段，基于 Lognormal 模型的复合衰落信道的中断容量值会普通出现高估的情形，且随着参与 ST 分集合并的发射端口数  $N$  的增多，这种高估的误差越来越大；随着发射功率的逐渐增加，2 种模型的中断容量值出现交叉又分离的现象，并且出现相反的表现，即  $N$  越小，误差越大。此外，随着图 10(b) 中光源发散角  $\theta$  的增加，即 ISI 的引入，

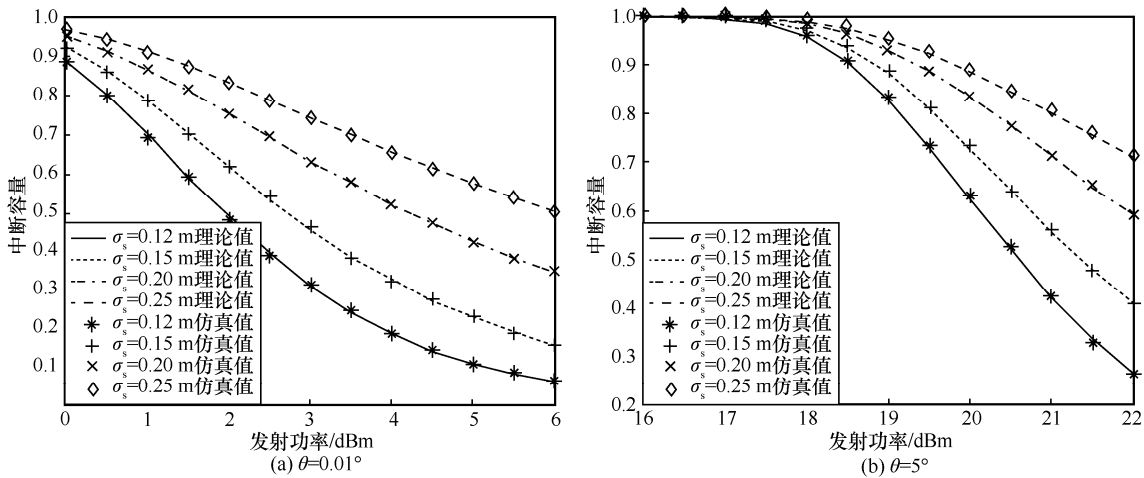


图 9 不同  $\sigma_s$  下, 系统中断容量随发射功率的变化

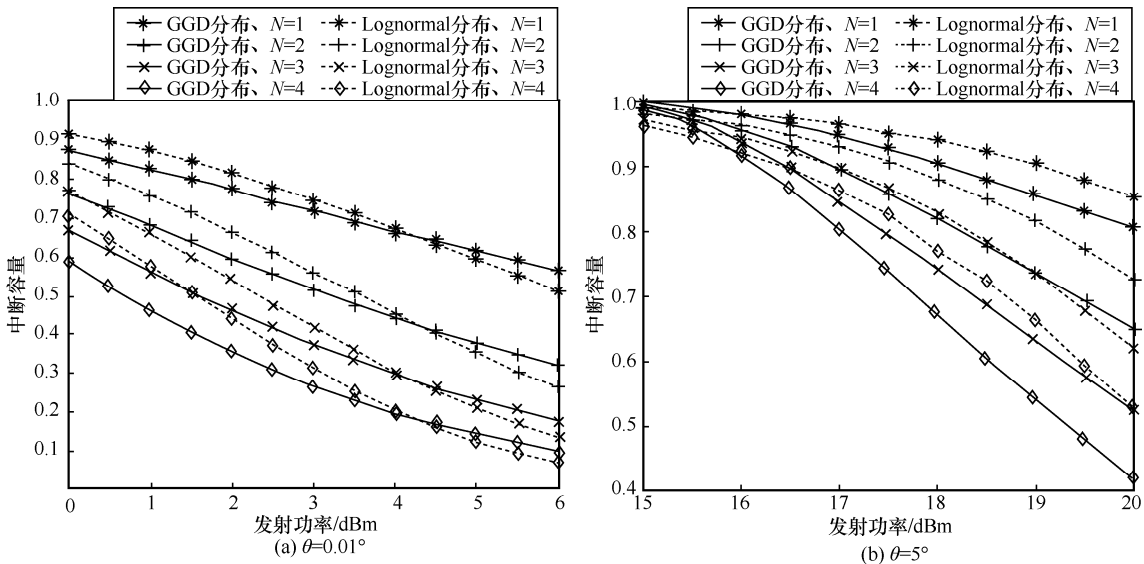


图 10 不同湍流模型下, 系统中断容量随发射功率的变化

普遍出现 Lognormal 分布模型的中断容量要高于标准值 GGD 模型的情况, 且  $N$  越大, 这种误差越大。这说明, 从中断容量的角度来看, 采用 Lognormal 模型来建模海洋弱湍流也是完全不可取的。

从本节的 4 组有关理论中断容量计算结果和 Monte Carlo 模拟仿真结果对比来看, 本文 2.2 节所述系统中断容量的理论分析也是正确的、合理的。

#### 4 结束语

本文在综合考虑了 FFIR 隐路径损耗和多径效应、GGD 弱海洋湍流, 以及存在零视轴指向误差的新颖聚合衰落环境中, 分析了采用 ST 传输方案的 MISO-UWOC 系统的遍历容量和中断容量。理论推导和数值仿真结果显示, 与传统 SISO-UWOC 结构

相比, 设置了多个源节点的 ST 传输分集技术对于系统遍历容量和中断容量的改善效果非常显著。系统遍历容量方面, 随着参与 ST 传输的源节点数目的逐步增多(从 1 增大到 4), 同样发射功率条件下, 极小光源发散角  $\theta = 0.01^\circ$  时, 系统遍历容量分别为原 SISO-UWOC 系统时的 1.28、1.39、1.46 倍; 而相同传输条件下的传输距离则分别增加 15.6%、20%、24.3%; 零视轴指向误差对遍历容量的不利影响也非常明显, 同等发射功率下, 指向误差抖动离差  $\sigma_s$  从 0.12 m 增大到 0.25 m 时, 相较于原 SISO-UWOC, MISO-UWOC 系统遍历容量的改善度分别为 54.5%、41.8%、20%, 下降迅速。此外, 当光源发散角增大到  $\theta = 5^\circ$  时, 相同距离情形下的 FFIR 时延扩展大幅增加, 其导致的 ISI 效应严重,

与小发散角相比,同等发射功率或同等参与 ST 传输节点个数等条件下,为获得相同的系统遍历容量,需增加发射功率 2~3 倍。中断容量方面也有类似的仿真结果。这些数据皆说明,不同光源入射初值角  $\theta$  所导致的 FFIR 时延扩展,即多径效应对系统容量的影响很大, UWOC 系统性能分析与仿真中不能忽视不同通信环境中 FFIR 所引入的 ISI 的影响。此外,因海水流动、浪涌等因素导致的发射机位置抖动引入的指向误差也会对系统容量产生较严重的损害,入射光轴抖动越大,容量性能越差。此外,本文对比了新颖 GGD 弱湍流模型和传统 Lognormal 弱湍流模型下的遍历容量和中断容量数据。结果显示,同等条件下,采用传统 Lognormal 模型的 MISO-UWOC 系统的遍历容量较精准 GGD 模型最大偏差达到 14.3%,而中断容量的最大偏差则达到 16.7%。这说明,若采用 Lognormal 湍流模型来分析 UWOC 系统,则在容量性能分析方面与实测的精准 GGD 模型之间存在明显误差。最后,本文提供的 Monte Carlo 数值仿真结果与理论推导计算结果吻合良好,表明所提 MISO-UWOC 系统的遍历容量和中断容量理论表达式非常准确,可以从理论层面为系统容量方面的分析提供快速计算支撑。

#### 参考文献:

- [1] ZHU S, CHEN X, LIU X, et al. Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 73: 1-28.
- [2] ALI M F, JAYAKODY D N K, LI Y H. Recent trends in underwater visible light communication (UVLC) systems[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 22169-22225.
- [3] SAEED N, CELIK A, AL-NAFFOURI T Y, et al. Underwater optical wireless communications, networking, and localization: a survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 94: 101935.
- [4] 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.
- [5] LIU W W, DING J P, ZHENG J, et al. Relay-assisted technology in optical wireless communications: a survey[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 194384-194409.
- [6] RAMAVATH P N, UDUPI S A, 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.
- [7] QADAR R, BIN Q W, NURMI J, et al. Effects of multipath attenuation in the optical communication-based Internet of underwater things[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 1-16.
- [8] SHARIFZADEH M, AHMADIRAD F. Performance analysis of underwater wireless optical communication systems over a wide range of optical turbulence[J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 609-616.
- [9] ZHANG S, ZHANG L, WANG Z C, et al. On performance of underwater wireless optical communications under turbulence[C]//*Proceedings of 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-2.
- [10] FEI C, HONG X J, DU J, et al. High-speed underwater wireless optical communications: from a perspective of advanced modulation formats[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100012.
- [11] 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.
- [12] FU Y Q. BER of underwater wireless optical communication systems with SIMO detection over strong oceanic turbulence[J]. *Journal of Optical Communications*, 2022, 43(3): 311-318.
- [13] WANG C, YU H Y, ZHU Y J, et al. Multi-LED parallel transmission for long distance underwater VLC system with one SPAD receiver[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 889-895.
- [14] JIANG H Y, QIU H B, HE N, et al. Performance of spatial diversity DCO-OFDM in a weak turbulence underwater visible light communication channel[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2271-2277.
- [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): 2455-2458.
- [16] 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.
- [17] JAMALI M V, CHIZARI A, SALEHI J A. Performance analysis of multi-hop underwater wireless optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(5): 462-465.
- [18] TABESHNEZHAD A, POURMINA M A. Outage analysis of relay-assisted underwater wireless optical communication systems[J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 297-305.
- [19] LI S, YANG 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.
- [20] LE-TRAN M, KIM S. Performance analysis of multi-hop underwater wireless optical communication systems over exponential-generalized gamma turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(6): 6214-6227.
- [21] 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 impair-

- ments[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 15327-15343.
- [22] LI Y, ZHANG Y X, ZHU Y. Capacity of underwater wireless optical links with pointing errors[J]. Optics Communications, 2019, 446: 16-22.
- [23] FU Y Q, DUAN Q, HUANG C, et al. Average BER performance of rectangular QAM-UWOC over strong oceanic turbulence channels with pointing error[J]. Optics Communications, 2020, 476: 126362.
- [24] ASHRAFZADEH B, ZAIMBASHI A, SOLEIMANI-NASAB E, et al. Unified performance analysis of multi-hop FSO systems over double generalized gamma turbulence channels with pointing errors[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7732-7746.
- [25] TORABI M, MOHAMMADI N, NERGUIZIAN C. Performance analysis of an asymmetric two-hop amplify-and-forward relaying RF-FSO system in a cognitive radio with partial relay selection[J]. Optics Communications, 2022, 505: 127478.
- [26] RICHARD S Q. Photonics and lasers: an introduction (Ch.17) [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [27] XU F, KHALIGHI M A, BOURENNANE S. Impact of different noise sources on the performance of PIN- and APD-based FSO receivers[C]/Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 211-218.
- [28] PROAKIS J G. Digital communications[M]. 4th ed. Boston: McGraw Hill, 2001.
- [29] 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.
- [30] COVER T M, THOMAS J A. Elements of information theory[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [31] 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.
- [32] WANG J Y, WANG J B, CHEN M, et al. Ergodic capacity and outage capacity analysis for multiple-input single-output free-space optical communications over composite channels[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 16107.

## [作者简介]



李岳衡 (1971- )，男，湖南永兴人，博士，河海大学教授，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。



徐贻宁 (1999- )，女，江苏宿迁人，河海大学硕士生，主要研究方向为水下无线光通信、通信信号处理。



居美艳 (1979- )，女，江西瑞昌人，博士，河海大学讲师，主要研究方向为水下无线光通信、移动通信关键技术、通信信号处理。



黄平 (1972- )，女，重庆人，博士，河海大学高级工程师，主要研究方向为水下无线光通信、纠错编解码技术、新型编码调制技术等。