

# 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

张馨文, 李岳衡, 江雨薇, 居美艳, 黄 平

(河海大学, 江苏南京 211100)

**摘 要:** 为克服传统水下弱湍流模型无法准确拟合实测数据的缺陷, 选取经实验测试验证的广义 Gamma 分布 (Generalized Gamma Distribution, GGD) 来表征弱海洋湍流, 并基于此提出综合考虑了 GGD 弱湍流、零视轴指向误差, 以及无衰落信道冲激响应 (Fading Free Impulse Response, FFIR) 所表征的隐路径损耗和多径效应的新聚合衰落信道模型. 接下来, 利用 Meijer-G 函数推导出综合了 GGD 弱湍流与零视轴指向误差的混合衰落概率密度函数闭型表达, 并据此分别推导出并行和串行中继水下无线光通信 (Underwater Wireless Optical Communication, UWOC) 系统中断概率的理论闭型公式. 最后, 则利用 Monte Carlo 数值仿真验证了上述推导的中断概率闭型表达的正确性, 并考察不同系统核心参数的选择对中断概率的影响. 研究表明: 中继节点的引入可以有效降低长距离传输时 UWOC 系统的中断风险; 而中继节点数、接收机孔径尺寸、入射光轴抖动方差等参数的选取, 皆会对系统的中断性能产生重要影响. 此外, 光源发散角增大导致的 FFIR 时延扩展将引发严重的符号间干扰, 进而导致系统中断概率普遍下降 1~3 个数量级.

**关键词:** 广义 Gamma 分布; 弱海洋湍流; 指向误差; 中继; 中断概率; 水下无线光通信

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.61832005)

**中图分类号:** TN929.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2023)11-3294-11

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20221160

## Outage Analysis for Relay-Aided Underwater Wireless Optical Communication over GGD Weak Turbulence with Pointing Errors

ZHANG Xin-wen, LI Yue-heng, JIANG Yu-wei, JU Mei-yan, HUANG Ping

(Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

**Abstract:** In order to overcome the shortcoming of the traditional underwater weak turbulence model that cannot accurately fit the measured data, the generalized gamma distribution (GGD) which has been verified by series of laboratory experiments is chosen to characterize the weak oceanic turbulence. Based on this, a new aggregated fading channel model is proposed, which takes into account the GGD weak turbulence, zero boresight pointing error, and the implicit path loss and multipath propagation effect characterized by fading free impulse response (FFIR). Next, a closed-form expression of the hybrid fading probability density function integrating the GGD weak turbulence and zero boresight pointing error is derived using the higher transcendental Meijer-G function, and then, the theoretical closed-form expressions for the outage probabilities of the parallel and serial relaying underwater wireless optical communication (UWOC) systems are derived accordingly. Finally, Monte Carlo simulations are provided to verify the correctness of the above-derived analytical formulas for the outage probability and to investigate the effect of different system core parameters on outage performance of the systems. The results show that the introduction of relay nodes can effectively reduce the outage risk of UWOC over long distances. In contrast, the number of relay nodes, receiver aperture size, incident optical beam jitter variance, and other parameters can affect the outage performance. In addition, the FFIR delay spread caused by increasing of the divergence angle of the light source will lead to serious inter-symbol interference, which will result in a general decrease of 1~3 orders of magnitude in the outage performance of the relaying UWOC systems.

**Key words:** generalized gamma distribution; weak oceanic turbulence; pointing error; relay; outage probability; underwater wireless optical communication

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

## 1 引言

近年来,随着世界各国面向海洋开展诸如资源探索、环境监测等活动的日渐频繁,水下无线光通信(Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)显得愈加迫切和重要.传统的水声通信虽然适用于中长距离的信息传输,但由于其低载频的先天性缺陷,传输速率远不能满足现代多媒体通信的基本需求;而水下射频通信由于其频率所致的巨大路径损耗,只适用于极短距离传输<sup>[1]</sup>.因此,研究并建立一个高速率、低延迟、高可靠性的水下无线传输系统业已成为众多学者和研究机构的重要研究内容.其中,UWOC以其大带宽、低时延、保密性强等突出特点吸引了众多科研工作者的关注,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>[2]</sup>.

实验测试表明<sup>[1]</sup>,可见光频段的蓝/绿光束相较于其他频率的光束在海水中的吸收损耗最小,因此常采用蓝/绿频段的光源来作为水下信息传输的载体.即便如此,海水中溶解的大量盐分和悬浮物等微粒仍会对水中传输的蓝/绿光束产生比较严重的吸收与散射作用<sup>[3]</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.而解决这一问题、进而有效扩展 UWOC 系统覆盖范围的手段之一就是采用所谓的无线中继传输技术<sup>[4]</sup>.虽然陆地自由空间光(Free Space Optical, FSO)通信系统中的中继传输技术已研究了多年<sup>[4]</sup>,不过,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 FSO 无线中继传输的方法和结果并不能直接照搬过来,像中断概率、误码率、信道容量等衡量系统性能的关键指标的研究仍需特别加以开展.作为前期基础,文献[5]以纯 Monte Carlo(MC)数值仿真的形式研究了海水吸收与散射效应对系统误码率的影响.文献[6]则研究了点对点(Point-to-Point, P2P) UWOC 系统在大范围光湍流模型下的系统误码率和中断概率性能.文献[7]研究了弱湍流环境中点对点 UWOC 系统的误码率.文献[8,9]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[10,11]则将研究对象推广到多人-多出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)模式的 UWOC 系统,并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,分析了系统采用不同分集合并的系统误码率性能.文献[12,13]则研究了在 P2P 或 MIMO 传输条件下,UWOC 系统采用单光子雪崩二极管

(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)或者硅光电倍增管(Silicon Photo-Multiplier, SiPM)等增强型光电接收机时,提高弱湍流衰落环境中链路有效通信距离的可能性.不过在上述这几篇涉及湍流衰落的论文中,作者都是直接移植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.然而经一些国外学者大量的实验测量和数据拟合试验,这两种广泛适用于陆地大气环境的湍流模型并不能准确拟合水下环境的湍流效应<sup>[14-16]</sup>,需根据具体的湍流生成机理采用广义 Gamma 分布(Generalized Gamma Distribution, GGD)<sup>[14,15]</sup>或者混合指数-广义 Gamma(Exponential-Generalized Gamma, EGG)<sup>[16]</sup>衰落模型来进行建模.此外,上述介绍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中继工作模式.文献[17,18]则在考虑了无衰落信道冲激响应(Fading Free Impulse Response, FFIR)所引发的符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)的条件下,分别研究了弱海洋湍流环境中,串行和并行中继 UWOC 系统的中断概率和平均误码率性能.不过,该论文的作者在建模弱海洋湍流时仍然选择的是不合理的 Lognormal 模型.此外,其系统数学模型虽然建模了 ISI 效应,但在仿真阶段,却仅考虑了相对清澈的海岸水质小角度光源散射角的情形,故而无法真实体现 ISI 对系统性能的影响.还有一点需要指出的是,由于 Lognormal 分布数学表达的特殊性,基于 Lognormal 模型所推导的系统性能无法获得理论闭型表达,只能通过数值积分的方式来进行近似计算.考虑到 UWOC 系统中继设计不仅仅局限于水下的场景,文献[19]分析了混合陆地射频(Radio Frequency, 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]则分析了混合了 RF-FSO-UWOC 的三跳中继系统的中断概率和误码率性能,并且这两篇文献在建模水下湍流信道时采用的皆是上述文献[16]所提出的 EGG 模型.

除了海洋湍流的影响之外,发射机指向误差<sup>[21]</sup>也会对 UWOC 系统性能产生重大影响.有关 UWOC 系统,分析含指向误差的系统性能方面的文章相对较少,比如,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,不过其建模海洋弱、强湍流采用的还是 Lognormal 和 Gamma-Gamma 分布模型,此外文章也没有考虑多径效应引起的 ISI 的影响.比较而言,在陆地大气环境的 FSO 系统中,有关中继和指向误差对系统影响的研究就比较多,

比如文献[24]及其所引参考文献等,但正如前文所指出的那样,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. 传统 FSO 的研究方法和成果可以借鉴,却不能直接移植.

为此,本文特别针对弱海洋湍流环境含零视轴指向误差中继 UWOC 系统的中断概率性能进行开创性研究. 首先,根据上述文献[14,15]报道的实测数据,采用 GGD 分布来建模海洋弱湍流效应;其次,在综合考虑了存在 FFIR 路径损耗和多径效应、GGD 弱湍流,以及零视轴指向误差三种衰落因素的聚合衰落信道模型下,推导并分析 P2P 和串、并行中继 UWOC 系统的中断概率理论表达,并通过数值仿真验证理论推导结果的正确性和系统核心参数对中断概率性能的影响. 本文主要的创新性工作和贡献总结如下:

(1) 不同于上述所有分析弱湍流环境 UWOC 系统性能的文献[6,7,10~13,17,18,22,23],本文根据实验室测试数据<sup>[14,15]</sup>采用简单 GGD 分布来建模 UWOC 系统所经历的弱湍流效应,以期更加合理地分析相应的 UWOC 系统性能;

(2) 首次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——首先利用高等超越 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(Probability Density Function, PDF)数学表达,随后又基于此推导出聚合衰落 UWOC 系统并行和串行中继环境中中断概率的理论闭型表达;

(3) 利用 MC 数值仿真验证推导所得并、串中继 UWOC 系统中中断概率理论闭型表达式的准确性,并考察了不同系统核心参数对系统中中断概率的影响.

## 2 系统模型

### 2.1 衰落接收信号模型及匹配滤波

考察一 P2P 的简单 UWOC 系统,当发射端采用开关键控(On-Off Keying, OOK)调制方式传输信息,而接收端采用传统 PIN(正-本征-负结)接收机以实现光电转换时,所接收到的电流时域信号可以表示成<sup>[25]</sup>

$$r(t) = R \cdot x(t) + n(t) \quad (1)$$

式(1)中,  $R = \eta q / hf$  为光电探测器的转换系数,其中  $\eta, q, h, f$  分别代表量子效率、电子电荷、普朗克常数和水中光信号的频率.  $n(t)$  为加性白高斯噪声过程,其每一时间采样点噪声的均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2 = 4KTB/R_L$ , 其中  $K, T, B, R_L$  分别表示玻尔兹曼常数、开尔文温度、滤波器带宽和系统的负载电阻值.  $x(t)$  表示受 FFIR、海洋湍流、指向误差等综合衰落因素影响的接收光信号,即

$$x(t) = s(t) * h(t) = h \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k \Gamma(t - kT_b) \quad (2)$$

式(2)中,  $s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k P(t - kT_b)$  表示传输数据序列,  $b_k \in \{0, 1\}$  是第  $k$  个时隙的 OOK 码元,  $T_b = 1/R_b$  表示 OOK 符号宽度,  $R_b$  为数据速率,  $P(t) = 2P_b \cdot M(t)$  为  $[0, T_b]$  时间间隔上的脉冲成型函数,  $M(t)$  为单位值门函数,  $P_b$  为 OOK 符号的平均发送功率.  $\Gamma(t) = P(t) * h_0(t)$  表示脉冲成型函数  $P(t)$  通过 FFIR 信道  $h_0(t)$  后的失真及路径损耗接收波形,  $h(t) = h \cdot h_0(t)$  是含乘性混合信道衰落因子  $h$  的聚合信道脉冲响应, 符号“\*”代表卷积算子.

为了分析问题的简单性,仅考虑对匹配滤波接收信号进行检测. 则根据匹配滤波的基本原理<sup>[26]</sup>, 接收器在第 0 个符号间隔期间的积分电流可以表示为<sup>[6]</sup>

$$r_{b_0} = \int_0^{T_b} r(t) \cdot M(t) dt = b_0 h \cdot u^{(s)} + h \sum_{k=-L}^{-1} b_k u^{(l,k)} + v_{T_b} \quad (3)$$

式(3)中,  $u^{(s)} = R \int_0^{T_b} \Gamma(t) dt$  是所需电流波形信号的匹配滤波器输出,  $u^{(l,k)} = R \int_0^{T_b} \Gamma(t - kT_b) dt$  表示由信道时间弥散导致的 ISI,  $L$  代表信道记忆长度(由 FFIR 和符号宽度  $T_b$  共同确定),  $b_0$  是第 0 个时隙的 OOK 码元,  $v_{T_b}$  是均值为零、方差为  $\sigma_{v_{T_b}}^2 = T_b \sigma_n^2$  的高斯积分噪声分量.

### 2.2 基于 GGD 模型的弱海洋湍流衰落数学描述

大量实验测试数据表明<sup>[14~16]</sup>, 在现有提出的用于描述海洋湍流衰落统计特性的 PDF 中, GGD 和 EGG 模型皆能取得湍流信道实测数据与理论曲线之间的极佳拟合. 其中, GGD 模型特别适合于模拟海水中由于存在温度和盐度的梯度而导致的弱湍流效应<sup>[14,15]</sup>. 此外, 当激光源配置光束扩展和准直器(Beam Expander-and-Collimator, BEC)、接收端配置孔径平均透镜(Aperture Averaging Lens, AAL)时, GGD 模型对光束所经历的因存在温、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>[15]</sup>.

比较而言, 文献[16]提出的混合 EGG 模型因为相较于三参数 GGD 模型提供了额外两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>[15]</sup>. 虽然当 EGG 模型中的权重系数  $\omega$  设置为 0 时, EGG 模型就退化为 GGD, 但正如上述分析时所指出的那样, EGG 模型中包括权重  $\omega$  在内的五个待优化参数是为了取得对各种强度湍流 PDF 更准确、更全面的综合模拟, 即便是对于 GGD 模型能够准确模拟的弱湍流效应, 经拟合求解的最优系数中  $\omega$  也未见等于 0 的参数配置(见文献[16]中表 1 和表 2). 此外, 由于 EGG 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 系统的性能分析和数值

仿真都将远较 GGD 模型复杂. 正是基于上述考量, 本文拟采用简单 GGD 模型来描述由温度与盐度变化导致的弱海洋湍流效应, 以便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. GGD 模型的 PDF 具有如下数学表达<sup>[14]</sup>:

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

式(4)中,  $b$  为尺度参数,  $a$  和  $c$  为形状参数,  $\Gamma(\cdot)$  表示伽马函数. 定义湍流闪烁指数  $\sigma_I^2$  为接收光强波动的归一化方差<sup>[15]</sup>, 由归一化理论和  $E[h_a]=1$  的约束条件, 不难计算出 GGD 模型中三个参数与闪烁指数  $\sigma_I^2$  之间的换算关系为

$$\sigma_I^2 = \frac{\Gamma(a)\Gamma(a+2/c)}{\Gamma^2(a+1/c)} - 1 \quad (5)$$

$$b = \frac{\Gamma(a)}{\Gamma(a+1/c)} \quad (6)$$

### 3 GGD 弱湍流环境含零视轴指向误差中继系统中断概率分析

#### 3.1 综合 GGD 弱湍流及零视轴指向误差混合衰落信道 PDF 的推导

本文综合考虑了一个包含由吸收与散射效应造成的路径损耗和多径效应、弱海洋湍流效应  $h_a$ , 以及零视轴指向误差  $h_p$  的 UWOC 系统聚合衰落信道模型. 其中, 路径损耗和多径效应部分是以隐性的形式体现在 FFIR 函数  $h_0(t)$  中, 其可以通过设定具体通信环境参数的 MC 数值仿真获得, 故而在混合衰落  $h$  表达式的描述上, 只需考虑湍流效应和指向误差即可, 即

$$h = h_p h_a \quad (7)$$

式(7)中, 距离发射点垂直距离为  $z$ 、径向误差为  $r$  的零视轴指向误差  $h_p$  可以近似表示为<sup>[21]</sup>

$$h_p(r; z) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{z_{eq}}^2}\right) \quad (8)$$

式(8)中,  $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$  表示接收机于探测器中心  $r=0$  处所收集到的激光束的功率比例,  $w_{z_{eq}}^2 = w_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)/2v \exp(-v^2)$  表示等效光束宽度,  $v = (\sqrt{\pi} r_a)/(\sqrt{2} \omega_z)$  表示接收机孔径  $r_a$  与光束宽度  $w_z$  的比值,  $\text{erf}(\cdot)$  是误差函数. 不失一般性, 零视轴抖动误差下, 接收光束的径向误差  $r$  服从 Rayleigh 分布, 则指向误差  $h_p$  的 PDF 经计算可表示为<sup>[21]</sup>

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0} h_p^{\gamma-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (9)$$

式(9)中,  $\gamma^2 = w_{z_{eq}}^2/(4\sigma_s^2)$ ,  $\sigma_s^2$  为接收机的抖动方差.

因此, 混合衰落因子  $h$  的联合 PDF 可以表示为

$$f_h(h) = \int_0^\infty f_{h|h_a}(h|h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a \quad (10)$$

式(10)中,  $f_{h|h_a}(h|h_a)$  为条件概率密度函数. 根据随机变量函数值的 PDF 的计算准则<sup>[26]</sup>, 有

$$\begin{aligned} f_{h|h_a}(h|h_a) &= f_{h_p}\left(\frac{h}{h_a}\right) \cdot \left|\frac{\partial h_p}{\partial h}\right| = \frac{1}{h_a} \frac{\gamma^2}{A_0} \left(\frac{h}{h_a}\right)^{\gamma-1} \\ &= \frac{\gamma^2}{(A_0 h_a)^\gamma} h^{\gamma-1}, h_a \geq \frac{h}{A_0} \end{aligned} \quad (11)$$

将(11)和式(4)代入式(9), 可得 GGD 湍流模型含零视轴指向误差条件下混合衰落信道  $h$  的联合 PDF 为

$$\begin{aligned} f_h(h) &= \int_0^\infty f_{h|h_a}(h|h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a \\ &= \int_{\frac{h}{A_0}}^\infty \frac{\gamma^2}{(A_0 h_a)^\gamma} h^{\gamma-1} \frac{c \cdot h_a^{ac-1}}{b^{ac}\Gamma(a)} \exp\left[-\left(\frac{h_a}{b}\right)^c\right] dh_a \end{aligned} \quad (12)$$

利用公式  $e^{-x} = G_{0,1}^{1,0}[x|_0]$  (文献[27], 式 8.4.3.1), 式(12)可以写作

$$f_h(h) = \frac{c\gamma^2 h^{\gamma-1}}{A_0^\gamma b^{ac}\Gamma(a)} \int_{\frac{h}{A_0}}^\infty h_a^{ac-\gamma-1} G_{0,1}^{1,0}\left[\left(\frac{h_a}{b}\right)^c \middle| -\right] dh_a \quad (13)$$

再利用文献[27]中式(2.24.2.3), 对照参数进行计算, 则式(13)可以求得为

$$\begin{aligned} f_h(h) &= \frac{c\gamma^2 h^{\gamma-1}}{(A_0 b)^{ac}\Gamma(a)} \frac{\sqrt{k_1} h^{ac-\gamma}}{l_1 (2\pi)^{(k_1-1)/2}} \\ &\quad \times G_{l_1, k_1+l_1}^{k_1+l_1, 0}\left[\left(\frac{1}{b^c k_1}\right)^{k_1} \left(\frac{h}{A_0}\right)^{l_1} \middle| \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \right. \\ &\quad \left. \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0)\right] \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中,  $l_1/k_1 = c$  ( $c$  为 GGD 分布的形状因子). 为避免表达式的冗余, 对其中一些固定参数进行归总:

$$C_1 = \frac{c\gamma^2}{(A_0 b)^{ac}\Gamma(a)} \frac{\sqrt{k_1}}{l_1 (2\pi)^{\frac{k_1-1}{2}}} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{1}{(b^c k_1)^{k_1}} \frac{1}{A_0^{l_1}} \quad (16)$$

则式(14)可进一步简化表示为

$$f_h(h) = C_1 h^{ac-1} \cdot G_{l_1, k_1+l_1}^{k_1+l_1, 0}\left[C_2 h^{l_1} \middle| \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \right. \\ \left. \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0)\right] \quad (17)$$

#### 3.2 聚合衰落中继 UWOC 系统中断概率闭形公式的推导

分别考虑如图 1(a) 和图 1(b) 所示的并行和串行中继 UWOC 通信系统, 它们都工作于“解码-转发”模式. 其中图 1(a) 所示的并行中继系统, 源节点 (Source Node, SN) 在  $N$  个并行中继节点 (Relay Node, RN) 的帮助下, 以两跳的方式间接传输信号至目标节点 (Destination Node, DN). 而图 1(b) 所示的串行中继系统, SN 发送的

原始信号则通过  $N$  个串行节点  $RN_i$  接力传输至目标节点 DN. 下面,我们将首先讨论 P2P-UWOC 链路的中断概率,推导其闭型表达. 以此为基础,再分别分析并行和串行中继 UWOC 通信系统的整体中断概率.

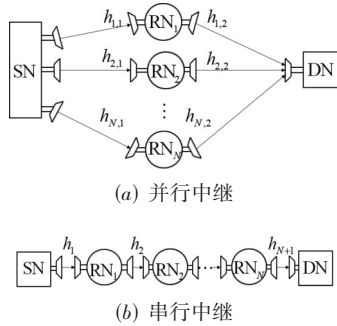


图1 中继 UWOC 系统工作结构示意图

### 3.2.1 P2P 链路的中断概率

“中断概率”定义为接收机输出信号的瞬时信噪比低于某指定阈值的概率<sup>[17]</sup>. 因此, P2P 链路的中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma < \gamma_{\text{th}}) \quad (18)$$

式(18)中,  $\gamma$  为瞬时接收信号的信噪比,  $\gamma_{\text{th}}$  是给定的阈值. 根据式(3)以及 UWOC 系统考虑 ISI 情形下对信噪

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} C_1 \frac{h_{\text{th}}^{ac}}{l_1} \cdot G_{2l_1, k_1+2l_1}^{k_1+l_1, l_1} \left[ C_2 h_{\text{th}}^{l_1} \left| \begin{array}{l} \Delta(l_1, 1-ac), \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \\ \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0), \Delta(l_1, -ac) \end{array} \right. \right] \quad (20)$$

### 3.2.2 并行中继系统的中断概率

设图 1(a) 所示并行中继链路共有  $N$  条并行支路, 且每条并行支路皆通过一个中继节点进行两跳中继

$$P_{i,j}^{\text{out}} = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} \int_0^{h_{i,j}^{\text{th}}} f_h(h) dh = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} C_1 \frac{(h_{i,j}^{\text{th}})^{ac}}{l_1} \cdot G_{2l_1, k_1+2l_1}^{k_1+l_1, l_1} \left[ C_2 (h_{i,j}^{\text{th}})^{l_1} \left| \begin{array}{l} \Delta(l_1, 1-ac), \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \\ \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0), \Delta(l_1, -ac) \end{array} \right. \right] \quad (22)$$

式(22)中,  $h_{i,j}^{\text{th}}$  表示第  $i$  条并行支路第  $j$  跳所对应的中断概率门限值, 即

$$h_{i,j}^{\text{th}} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}} \sigma_{T_b}^2}{[u^{(s)}]^2 - \gamma_{\text{th}} \left[ \sum_{k=-L}^{-1} b_k u^{(l,k)} \right]^2}} \quad (23)$$

式(23)中  $u^{(s)}$  和  $u^{(l,k)}$  分别为相应 P2P 链路所对应的所需信号分量与干扰分量,  $u^{(s)} = R \int_0^{T_b} P(t) * h_0^{i,j}(t) dt$ ,  $u^{(l,k)} = R \int_{-kT_b}^{-(k-1)T_b} P(t) * h_0^{i,j}(t) dt$ , 其中  $h_0^{i,j}(t)$  为基于 MC 方法获得的 UWOC 系统第  $i$  条并行支路、第  $j$  跳的 FFIR.

当采用并行中继传输方案时, 各并行路径的中断性能取决于该路径中各跳支路的中断概率. 显然, 第  $i$

比的一般性定义, 即将干扰项 ISI 视为噪声而归入背景噪声项, 以接收信号的功率与干扰加噪声的功率之比定义为系统的信噪比<sup>[6]</sup>, 则 GGD 弱湍流环境含零视轴指向误差 UWOC 系统 P2P 链路的中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}} = \Pr \left[ \frac{(h \cdot u^{(s)})^2}{\left| h \sum_{k=-L}^{-1} b_k u^{(l,k)} \right|^2 + \sigma_{T_b}^2} \leq \gamma_{\text{th}} \right] \quad (19)$$

$$= \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} \int_0^{h_{\text{th}}} f_h(h) dh$$

式(19)中  $h_{\text{th}} = \sqrt{\gamma_{\text{th}} \sigma_{T_b}^2} / \sqrt{[u^{(s)}]^2 - \gamma_{\text{th}} \left[ \sum_{k=-L}^{-1} b_k u^{(l,k)} \right]^2}$  为与接收信噪比阈值  $\gamma_{\text{th}}$  相对应的混合衰落信号  $h$  的积分上限; 其中 FFIR 导致的路径损耗和多径效应分别体现在  $u^{(s)}$  和  $u^{(l,k)}$  这两项之中.

将式(17)代入式(19), 有

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} C_1 \int_0^{h_{\text{th}}} h^{ac-1} \cdot G_{l_1, k_1+l_1}^{k_1+l_1, 0} \left[ C_2 h^{l_1} \left| \begin{array}{l} \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \\ \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0) \end{array} \right. \right] dh \quad (20)$$

再利用文献[27]中式 2.24.2.2, 根据参数对照再经化简处理后式(20)可计算得

$$P_{i,j}^{\text{out}} = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} C_1 \frac{(h_{i,j}^{\text{th}})^{ac}}{l_1} \cdot G_{2l_1, k_1+2l_1}^{k_1+l_1, l_1} \left[ C_2 (h_{i,j}^{\text{th}})^{l_1} \left| \begin{array}{l} \Delta(l_1, 1-ac), \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \\ \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0), \Delta(l_1, -ac) \end{array} \right. \right] \quad (21)$$

传输. 则在第  $i$  条并行支路 ( $1 \leq i \leq N$ ) 的第  $j$  跳 ( $1 \leq j \leq 2$ ) 这一 P2P 链路中的中断概率, 借鉴式(21)的结果可表示为

$$P_{i,j}^{\text{out}} = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} C_1 \frac{(h_{i,j}^{\text{th}})^{ac}}{l_1} \cdot G_{2l_1, k_1+2l_1}^{k_1+l_1, l_1} \left[ C_2 (h_{i,j}^{\text{th}})^{l_1} \left| \begin{array}{l} \Delta(l_1, 1-ac), \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \\ \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0), \Delta(l_1, -ac) \end{array} \right. \right] \quad (22)$$

条并行支路的中断概率应为该并行支路中两条串联链路全通概率的补, 即

$$P_i^{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - \prod_{j=1}^2 [1 - P_{i,j}^{\text{out}}(\gamma_{\text{th}})] \quad (24)$$

则整个并行链路的中断概率计算公式为所有并行链路全断的概率, 即

$$P_{\text{out}}^{\text{Para}}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{i=1}^N P_i^{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \prod_{j=1}^2 [1 - P_{i,j}^{\text{out}}(\gamma_{\text{th}})] \right] \quad (25)$$

### 3.2.3 串行中继系统的中断概率

设图 1(b) 所示的串行中继链路中总共有  $N$  个中继节点, 用  $P_n^{\text{out}}(\gamma_{\text{th}})$  表示其中第  $n$  ( $1 \leq n \leq N+1$ ) 跳的中断概率, 由式(21)有

$$P_n^{\text{out}} = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} \int_0^{h_n^{\text{th}}} f_h(h) dh = \frac{1}{2^L} \sum_{\{b_k\}} C_1 \frac{(h_n^{\text{th}})^{ac}}{l_1} \cdot G_{2l_1, k_1+2l_1}^{k_1+l_1, l_1} \left[ C_2 (h_n^{\text{th}})^{l_1} \left| \begin{array}{l} \Delta(l_1, 1-ac), \Delta(l_1, 1-ac+\gamma^2) \\ \Delta(l_1, \gamma^2-ac), \Delta(k_1, 0), \Delta(l_1, -ac) \end{array} \right. \right] \quad (26)$$

式(26)中,  $h_n^{\text{th}}$  表示第  $n$  跳所对应的中断概率门限值, 即

$$h_n^{\text{th}} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}} \sigma_{T_b}^2}{[u_n^{(s)}]^2 - \gamma_{\text{th}} \left[ \sum_{k=-L}^{-1} b_k u_n^{(L,k)} \right]^2}} \quad (27)$$

式(27)中,  $u_n^{(s)}$  和  $u_n^{(L,k)}$  分别为第  $n$  跳链路中所对应的所需信号分量与干扰分量,  $u_n^{(s)} = R \int_0^{T_b} P(t) * h_0^n(t) dt$ ,  $u_n^{(L,k)} = R \int_{-kT_b}^{-(k-1)T_b} P(t) * h_0^n(t) dt$ ,  $h_0^n(t)$  为基于 MC 方法获得的 UWOC 系统串行链路第  $n$  跳的 FFIR.

当采用串行中继传输方案时, 最终的系统中断性能取决于每一跳的中断性能, 即任一跳或几跳组合中继链路的中断, 都会导致整个链路的中断. 显然, 串行链路总的中断概率用整个串行链路全通概率的补来表示将更为方便, 即

$$\begin{aligned} p_{\text{out}}^{\text{Serial}}(\gamma_{\text{th}}) &= \Pr(\min\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{N+1}\} \leq \gamma_{\text{th}}) \\ &= 1 - \prod_{n=1}^{N+1} \Pr(\gamma_n \geq \gamma_{\text{th}}) = 1 - \prod_{n=1}^{N+1} [1 - P_n^{\text{out}}(\gamma_{\text{th}})] \end{aligned} \quad (28)$$

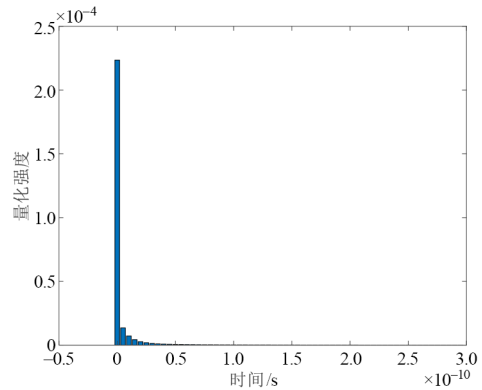
### 3.3 数值仿真与分析

本节研究上文推导出的 GGD 弱湍流环境聚合衰落信道模型下中继 UWOC 系统的中断概率. 由于路径损耗和多径效应是以隐性的形式含在 FFIR 函数  $h_0(t)$  中, 故需先搭建一个 MC 数值仿真平台来获取基于平行激光源的 UWOC 系统传播链路上的 FFIR. 具体的平台搭建方法和数学原理描述可参见文献[29]. 仿真环境选择了常见的近海海岸水质, 吸收和散射系数分别为  $(a', b') = (0.179, 0.219) m^{-1}$ [3], 表 1 列出了用于 FFIR 模拟及系统仿真所需的一些重要参数的典型取值[14,29].

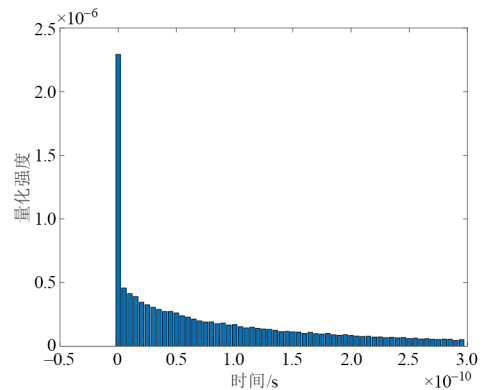
图 2(a) 和图 2(b) 分别展示了近海海岸水质中 20 m 平行激光源 UWOC 链路在激光束发散角  $\theta$  分别为  $0.43^\circ$  和  $3^\circ$  时的 FFIR 仿真数据. 对比该图中两子图可见, 相较于 OOK 符号 1 Gbps 的传输速率, 即 1 ns 的符号宽度  $T_b$ , 图 2(a) 所示的光束发散角  $\theta = 0.43^\circ$  时所对应的 FFIR 时延扩展仅约为 0.05 ns, ISI 效应基本可以忽略, 而图 2(b) 所示的光束发散角  $\theta$  增大为  $3^\circ$  时, 其所对应的 FFIR 时延扩展则大幅增加到 0.3 ns, 即引入了比较强的 ISI. 这表明不同传输参数环境和信道条件下的 FFIR 仿真数据差异很大, 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. 需要说明的一点是: 由于后续仿真中传输距离  $z$  值众多, 受篇幅的限制, 我们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  $z = 20$  m 为例, 针对传输条件  $\theta$  的变化对 FFIR 的影响进行了仿真举例说明. 另外, 图中纵坐

表 1 FFIR 模拟及数值仿真主要参数

参数	数值
传输速率 $R_b$	1 Gbps
光源波长 $\lambda$	532 nm
HG 模型非对称因子 $g$	0.924
光波束宽度 $W_b$	3 mm
透射光子总数 $N_t$	$10^9$
接收机半角视场 $\theta_{\text{FOV}}$	$40^\circ$
孔径直径 $D_0$	20 cm
光子权重阈值 $W_{\text{th}}$	$10^{-6}$
量子效率 $\eta$	0.8
玻尔兹曼常数 $K$	$1.38 \times 10^{-23}$ J/K
等效温度 $T$	290 K
滤波器带宽 $B$	10 GHz
负载电阻 $R_L$	100 $\Omega$
光源发散角(半角) $\theta$	$0.43^\circ/3^\circ$
接收机位置	深海(忽略气水交界面和背景辐射影响)
闪烁指数 $\sigma_I^2$	0.107 4
GGD 形状参数 $c$	13
信噪比门限 $\gamma_{\text{th}}$	1 dB



(a)  $\theta = 0.43^\circ$



(b)  $\theta = 3^\circ$

图 2 近海海岸 20 m 平行激光 UWOC 链路 FFIR 数据

标“量化强度”为一表征接收光强的参数,其定义为接收光子的总权重与信源总发射光子权重的比值,故为一无量纲的参变量<sup>[29]</sup>.

下面,我们将采用MC数值模拟方法来验证上述推导出的并行和串行中继UWOC系统中中断概率理论表达式的正确性,并探讨不同通信环境和系统参数的选取对中断概率的影响.

### 3.3.1 并行中继链路仿真结果与分析

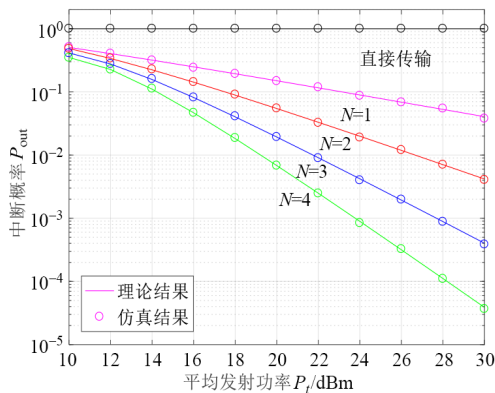
对于图1(a)所列表的并行中继UWOC系统,图3(a)至图5(a)分别给出了发散角 $\theta$ 为 $0.43^\circ$ 时,UWOC系统在不同并行中继节点数时系统中中断概率随平均发射功率、不同发射功率时系统中中断概率随接收机孔径尺寸,以及不同发射功率条件下系统中中断概率随光束抖动标准差的理论计算值和MC仿真值变化曲线.而图3(b)至图5(b)则给出了发散角 $\theta=3^\circ$ 时的对应仿真图形.对比这两组图形数据可见,增大激光束的发散角将导致更大的FFIR时延扩展(见图2),即引入不可忽略的ISI,相应的中断概率性能相较于前者皆明显变差.

具体来说,图3(a)和图3(b)绘制了当传输距离 $z=$

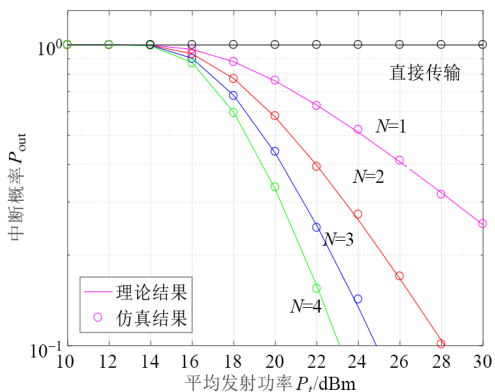
40 m(即SN经某中继至DN之间的总链路距离)、 $r_a=0.1$  m和 $\sigma_s=0.15$  m时,具不同并行路径数 $N$ 的UWOC系统中中断概率随平均发射功率变化的曲线.为更清楚地进行比较,不使用中继节点的直传方案也一并绘制于图中.从仿真结果可以看出:不论何种光束发散角情形,直传方案的中断性能都是最差的,即在近海海岸水质的传输环境下,40 m的直传工作方式基本无法接受,需要引入中继节点才能改善接收性能;而对于一个合适的固定平均发射功率 $P_t$ ,随着所引入的并行中继链路的增多,系统中中断概率会迅速下降.不过,随着ISI的引入,增大 $N$ 所带来的中断性能改善明显收窄.

图4(a)和图4(b)给出了在 $z=40$  m、 $\sigma_s=0.15$  m和 $N=2$ 条件下,不同发射功率时,UWOC系统中中断概率随接收机孔径 $r_a$ 之间的变化关系.可以看出,随着接收机孔径的逐渐增加,系统的中断概率也不断改善,这是因为孔径越大,接收的光强信号越多,从而导致输出信噪比增大、系统性能提升.同样,ISI的引入也很大程度弱化了这种改善趋势.

图5(a)和图5(b)给出了在 $z=40$  m、 $r_a=0.1$  m和

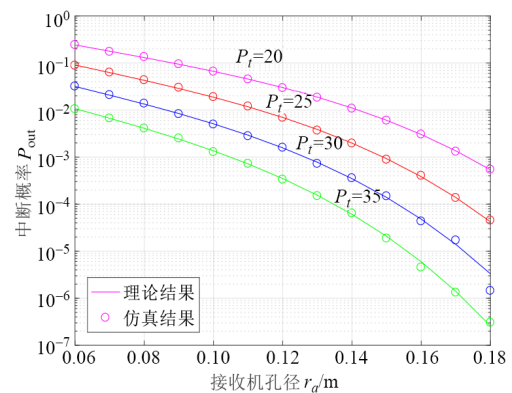


(a)  $\theta=0.43^\circ$

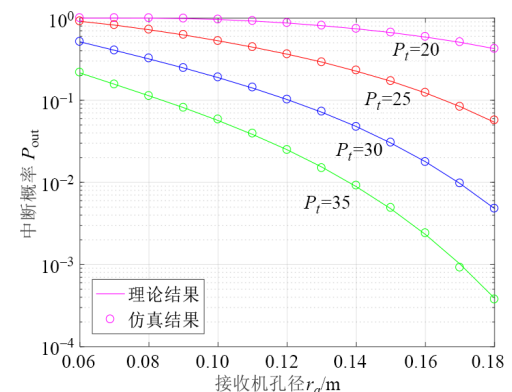


(b)  $\theta=3^\circ$

图3 不同 $N$ 值下并行中继UWOC系统中中断概率理论值与仿真值随 $P_t$ 变化的曲线( $z=40$  m,  $r_a=0.1$  m,  $\sigma_s=0.15$  m)



(a)  $\theta=0.43^\circ$



(b)  $\theta=3^\circ$

图4 不同 $P_t$ 值下并行中继UWOC系统中中断概率理论值与仿真值随 $r_a$ 变化的曲线( $N=2$ ,  $z=40$  m,  $\sigma_s=0.15$  m)

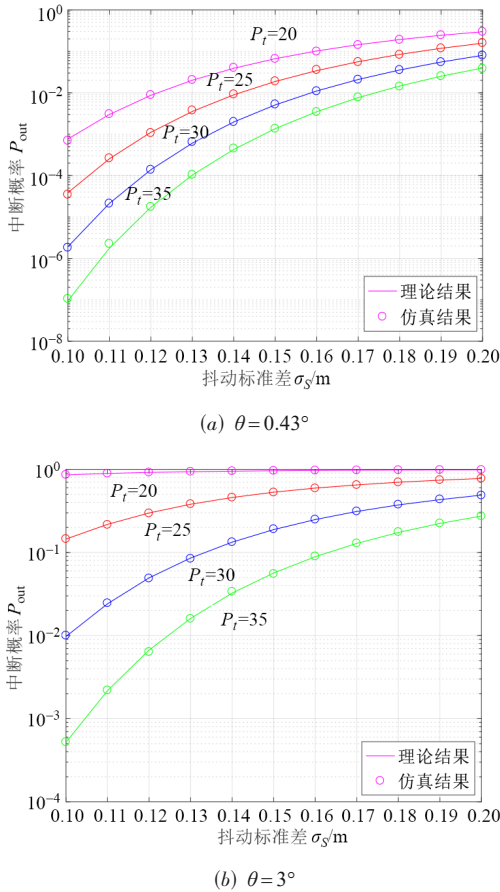


图5 不同  $P_t$  值下并行中继 UWOC 系统中中断概率理论与仿真值随  $\sigma_s$  变化的曲线 ( $N=2, z=40\text{ m}, r_a=0.1\text{ m}$ )

$N=2$  条件下,在不同的发射功率下,系统中断概率随抖动标准差  $\sigma_s$  之间的变化关系.可以看出,随着抖动标准差的增大,并行中继系统的中断概率值将不断增大,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变弱的随机变化(即引入了抖动损耗或抖动误差)的缘故.同样,对比图 5 两子图可以看出,ISI 的引入进一步加速了相应系统性能的恶化.

此外,两组仿真图形数据还给出了对应条件下的系统中断概率的 MC 数值仿真结果,其与理论推导所得的系统中断概率的闭型公式的计算结果完全重合.这也从另一个侧面验证了前文所推导出的有关并行中继 UWOC 系统中断概率理论闭型表达式的正确性.

### 3.3.2 串行中继链路仿真结果与分析

对于如图 1(b) 所示的串行中继 UWOC 系统,图 6(a)、图 7(a)、图 8(a) 分别给出了发散角  $\theta$  为  $0.43^\circ$  时, UWOC 系统在不同串行中继节点数条件下系统中断概率随平均发射功率、不同发射功率时系统中断概率随接收机孔径尺寸,以及不同发射功率条件下系统中断概率随光束抖动标准差的理论计算值和 MC 仿真

值变化的曲线.而图 6(b)、图 7(b)、图 8(b) 则给出了发散角  $\theta=3^\circ$  时的对应仿真曲线.对比这两组仿真数据可见,类似于并行工作模式,增大激光束的发散角  $\theta$  所引入的不可忽略的 ISI 同样将恶化系统的串行中断概率性能.

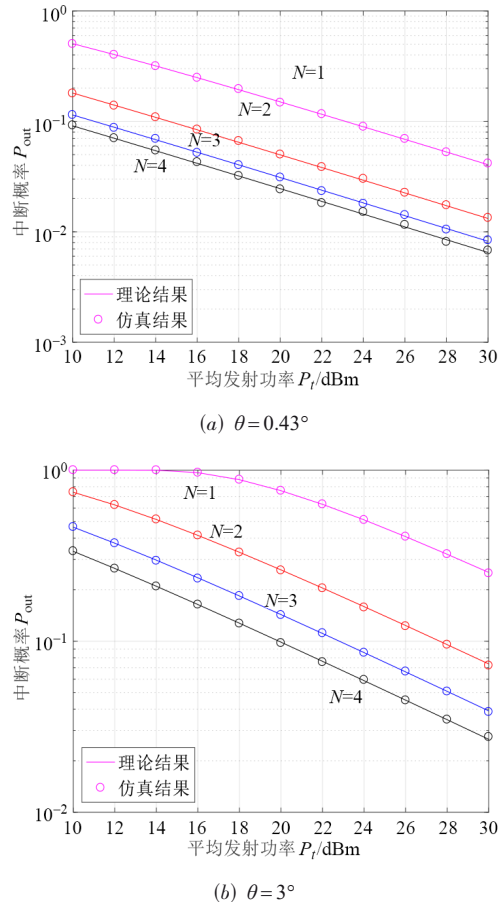


图6 不同  $N$  值下串行中继 UWOC 系统中断概率理论与仿真值随  $P_t$  变化的曲线 ( $z=40\text{ m}, r_a=0.1\text{ m}, \sigma_s=0.15\text{ m}$ )

具体来说,图 6(a) 和图 6(b) 绘制了当传输总距离  $z=40\text{ m}$ 、 $r_a=0.1\text{ m}$  和  $\sigma_s=0.15\text{ m}$  时,具不同数目的串行中继节点 UWOC 系统中断概率随平均发射功率变化的曲线.从仿真结果可以看出,不论何种光束发散角情形,对于一个固定的平均发射功率,随着所引入的串行中继节点数目的增多,系统中断概率呈显著下降趋势;不过,随着 ISI 的引入,同样节点数目下的系统中断概率性能明显有所恶化,以中继节点数  $N=1$  为例,当发射功率为  $14\text{ dBm}$  时,系统引入 ISI 前中断概率为  $3.2 \times 10^{-1}$ ,引入 ISI 后中断概率接近于 1,中断概率性能恶化了约 213%.

此外,对比图 3(a) 和图 6(a) 可知:当  $N=1$  时,并联和串联中继 UWOC 系统的中断概率性能是一样的,这是因为此时它们都是包含源节点和目标节点的两跳中继架构;当  $N=2, 3, 4$  时,在相同  $N$  值的条件下,高发

功率 $P_i$ 时,并行中继 UWOC 系统的性能要明显优于串行中继的性能,而小发射功率 $P_i$ 情况则正好相反.这是因为在小发射功率时,串行中继系统 P2P 链路之间的距离随 $N$ 值的增加明显比并行中继时的 P2P 距离短(并行中继是固定为每条并行支路只有一个中继节点的两跳结构),此时路径损耗为主要影响因素,进而导致具有固定距离的并行系统的性能下降较快;而在大发射功率情形下,并行中继系统因存在多条并行支路,其系统中断概率由所有支路全部中断为衡量标准,故而相较于仅有一条单连通链路的串行中继系统而言,抗中断能力更强,即当并行中继系统中存在一个或多个中继节点断开而导致某一个或某几个支路断开,但剩余支路仍继续连通时,远比串行系统中某一条链路中断就导致整个系统中断的风险来得小.

图 7(a)和图 7(b)显示了当 $z=40\text{ m}$ 、 $\sigma_s=0.15\text{ m}$ 和 $N=2$ 时,在不同发射功率条件下,串行中继系统中断概率随接收机孔径之间的变化关系.可以看出,随着接收机孔径的增加,串行中继系统的中断概率将不断改善,这同样是由于孔径增大导致光强信号增多,从而增大了输出信噪比.同样,类似于并行链路情形,ISI 的引入

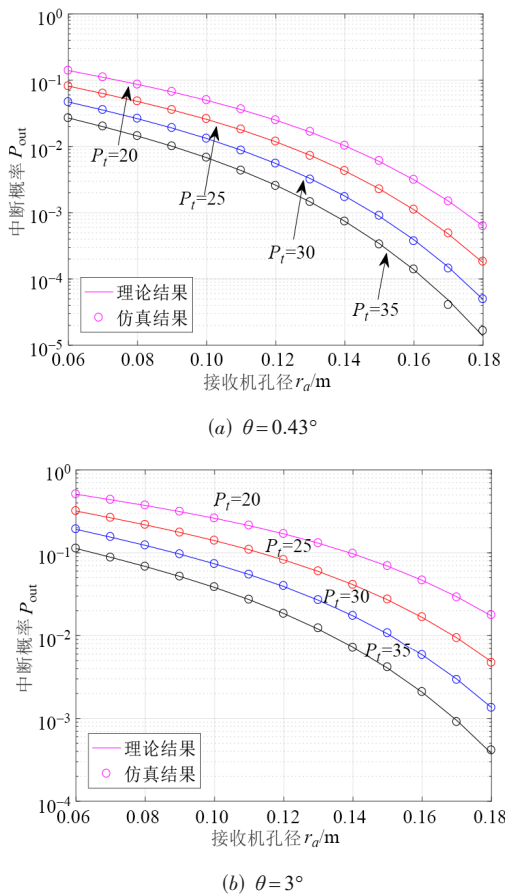


图 7 不同 $P_i$ 值下串行中继 UWOC 系统中断概率理论值与仿真值随 $r_a$ 变化的曲线( $N=2$ ,  $z=40\text{ m}$ ,  $\sigma_s=0.15\text{ m}$ )

也弱化了此种改善效果.

图 8(a)和图 8(b)则给出了当 $z=40\text{ m}$ 、 $r_a=0.1\text{ m}$ 和 $N=2$ 时,在不同的发射功率下, UWOC 系统的串行中断概率随抖动标准差之间的变化关系.可以看出,抖动标准差的增大同样导致了系统中断概率的恶化,究其原因,同样是在入射光轴存在抖动的情形下,接收机引入了所谓的抖动损耗.此外, ISI 的引入加速了相应系统性能的恶化.

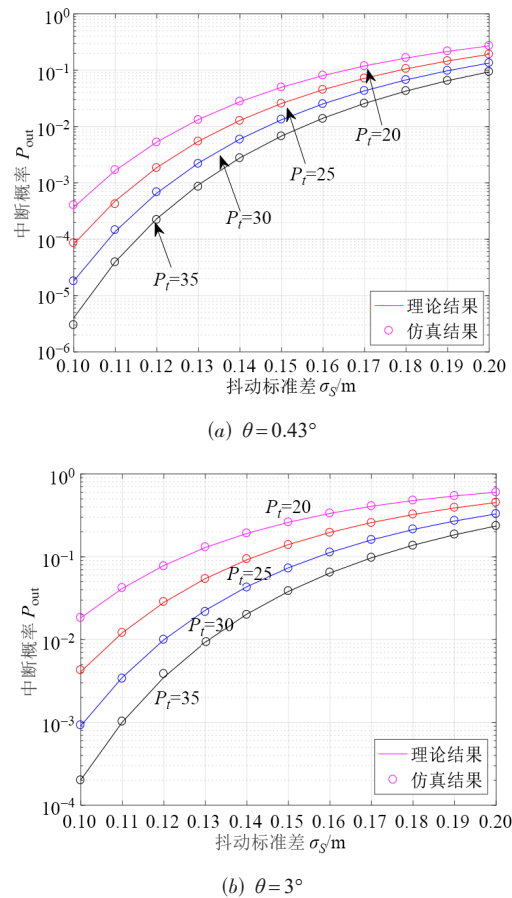


图 8 不同 $P_i$ 值下串行中继 UWOC 系统中断概率理论值与仿真值随 $\sigma_s$ 变化的曲线( $N=2$ ,  $z=40\text{ m}$ ,  $r_a=0.1\text{ m}$ )

此外,我们同样给出了这两组串行中继 UWOC 系统相应条件下的中断概率 MC 数值仿真结果,并与其理论推导所得的系统中断概率闭型公式计算结果进行对比,发现完全吻合.这也验证了前文所推导出的有关串行中继 UWOC 系统中断概率理论闭型表达式的正确性.

## 4 结论

本文主要研究了综合考虑 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聚合衰落传输环境中,并行和串行中继 UWOC 系统的中

断概率性能. 理论推导和数值仿真结果显示, 不论并行还是串行中继, 在水下长距离通信的情形下, 中继节点的引入都将极大地降低系统中断的风险, 且中断概率性能的改善与节点数目的增加呈比例递增的关系; 而增大接收机孔径尺寸也能有效改善系统中断概率性能. 另外, 不同传输距离和光源辐射特性所导致的 FFIR 时延扩展, 即多径效应对系统中断概率的影响很大, 在 ISI 干扰严重且不考虑相应的抵消技术的前提下, 并行和串行中继系统的性能普遍降低 1~3 个数量级, 因此, 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, 海洋湍流等因素导致的发射机位置抖动引入的指向误差也会对中断概率产生比较严重的损害, 入射光轴抖动越大, 系统性能越差. 最后, 本文提供的数值仿真结果与理论结果吻合良好, 表明文中所导出的并、串行中继 UWOC 系统的中断概率理论闭型表达式非常准确, 完全可以从理论层面为系统中断概率的分析提供快速计算支撑.

#### 参考文献

- [1] 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: 101935.1-101935.35.
- [2] ALI M F, JAYAKODY D, CHURSIN Y, et al. Recent advances and future directions on underwater wireless communications[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2019, 26(100): 1-34.
- [3] MOBLEY C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*[M]. San Diego: Academic Press, 1995.
- [4] LIU W, DING J, ZHENG J, et al. Relay-assisted technology in optical wireless communications: A survey[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 194384-194409.
- [5] QADAR R, QAIM W, NUMI J, et al. Effects of multipath attenuation in the optical communication-based internet of underwater things[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6201.
- [6] MAHSA S, MAHSA A. Performance analysis of underwater wireless optical communication systems over a wide range of optical turbulence[J]. *Optics Comm*, 2018(427): 609-616.
- [7] YI X, LI Z, LIU Z. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(6): 1273-1278.
- [8] CHI N, SHI M. Advanced modulation formats for underwater visible light communications [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(12): 120603.
- [9] FEI C, HONG X, DU J, et al. High-speed underwater wireless optical communications: From a perspective of advanced modulation formats[J]. *2019, Chinese Optics Letters*, 17(10): 100012.
- [10] JAMALI M V, SALEHI J A, AKHOUNDI F. Performance studies of underwater wireless optical communication systems with spatial diversity: MIMO scheme[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 65(3): 1176-1192.
- [11] HUANG A, TAO L, WANG C, et al. Error performance of underwater wireless optical communications with spatial diversity under turbulence channels[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7600-7608.
- [12] JI Y, WU G, WANG C. Generalized likelihood block detection for SPAD-based underwater VLC system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(1): 7900510.
- [13] LI J, YE D, FU K, et al. Single-photon detection for MIMO underwater wireless optical communication enabled by arrayed LEDs and SiPMs[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25922-25944.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] TABESHNEZHAD A, POURMINA M A. Outage analysis of relay-assisted underwater wireless optical communication systems[J]. *Optics Comm*, 2017, 405(2017): 297-305.
- [18] 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.
- [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] SARMA P, DEKA R, ANEES S. Performance analysis of DF based mixed triple hop RF-FSO-UWOC cooperative system[C]//2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Victoria: IEEE, 2020: 1-5.
- [21] 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.
- [22] LI Y, ZHANG Y, 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 Trans on Wireless Comm., 2020, 19(11): 7732-7746.
- [25] FANG X, KHALIGHI M A, BOURENNANE S. Impact of different noise sources on the performance of PIN- and APD-based FSO receivers[C]//International Conference on Telecommunications. Piscataway: IEEE, 2012: 211-218.
- [26] PROAKIS J G. Digital Communications[M]. 4th edition. Boston: McGraw-Hill Companies, Inc, 2001.
- [27] 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.
- [28] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of Integrals, Series and Products[M]. 7th edition. San Diego: Academic Press, 2007.
- [29] COX W C. Simulation, Modeling, and Design of Underwater Optical Communication Systems[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.



李岳衡(通讯作者) 男, 1971年10月出生, 湖南永兴人. 东南大学工学博士. 现为河海大学教授, 研究生导师. 主要研究方向为水下无线光通信、人工智能与数学优化、大规模MIMO传输技术等. 中国电子学会会员编号: E190004844S.

E-mail: yueheng\_li@hhu.edu.cn



江雨薇 女, 1999年6月出生, 江苏宿迁人. 河海大学计算机与信息学院硕士研究生. 主要研究方向为水下无线光通信.

E-mail: 2294794082@qq.com

#### 作者简介



张馨文 女, 1998年12月出生, 陕西汉中  
人. 河海大学计算机与信息学院硕士研究生.  
主要研究方向为水下无线光通信.

E-mail: 1065361522@qq.com