



专题：水下通信网络技术

## RIS 辅助最优发射选择水下无线光通信系统性能分析

赵公诺<sup>1</sup>, 岳殿武<sup>2</sup>, 杨佳宁<sup>1</sup>, 张琦<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;

2. 福耀科技大学计算与人工智能学院, 福建 福州 350109)

**摘要:** 水下无线光通信 (underwater wireless optical communication, UWOC) 因最低的链路时延、最高的传输速率和最低的实施成本而被广泛应用于高速大容量的水下数据传输。在高传输速率下, 即使是短时间的阻塞或遮挡也会导致突然的通信中断, 从而造成大量传输信息的丢失。为解决通信链路被阻断的问题, 并提高系统传输稳定性, 提出一种基于可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 辅助的 UWOC 系统。具体研究过程如下。(1) 将源端到目的端的级联湍流信道衰落系数建模为 Gamma-Gamma 分布, 并考虑了波束抖动和 RIS 抖动引起的指向误差。(2) UWOC 系统采用强度调制直接检测, 发射光源可通过接收机的反馈切换至最佳光源进行通信传输。(3) 推导了 RIS 辅助系统瞬时接收信噪比的概率密度函数。基于概率密度函数, 给出了中断概率的闭式表达式。(4) 推导出了有限信噪比分集阶数和高信噪比下的渐近分集阶数的闭式表达式。(5) 通过蒙特卡罗模拟, 验证了推导结果的正确性。理论分析与仿真实验均表明, 增加发射光源数量, 能够显著提升系统的传输稳定性。当发射光源数量和 RIS 块数乘积一定时, 系统会有相同的渐近分集阶数。

**关键词:** 水下无线光通信; RIS; 海洋湍流; 最优选择

**中图分类号:** TN929

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025196

## Performance analysis of underwater wireless optical communication system assisted by RIS for optimal transmission selection

ZHAO Gongnuo<sup>1</sup>, YUE Dianwu<sup>2</sup>, YANG Jianing<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>

1. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

2. School of Computing and Artificial Intelligence, Fuyao University of Science and Technology, Fuzhou 350109, China

**Abstract:** Underwater wireless optical communication(UWOC) has been widely used for high-speed and high-capacity underwater data transmission because of the lowest link delay, the highest transmission rate and the lowest implementation cost. At high transmission rates, even a short period of blockage or occlusion can lead to sudden communication interruption, which results in the loss of a large amount of transmitted information. To address the issue of

收稿日期: 2025-06-01; 修回日期: 2025-09-16

通信作者: 岳殿武, dianwuyue@fyust.edu.cn

communication link blockage and improve system transmission stability, a RIS-assisted UWOC system was proposed. The specific research process was as follows: (1) the cascaded turbulent channel fading coefficients from source to destination were modeled as Gamma-Gamma distributions, and the pointing errors caused by beam jitter and RIS jitter were considered. (2) The UWOC system employed intensity modulation with direct detection, and the transmitting light source could be switched to the optimal one for communication based on feedback from the receiver. (3) The probability density function of the instantaneous received signal-to-noise ratio(SNR) of the RIS-assisted system was derived. Based on the probability density function, a closed-form expression for the interruption probability was provided. (4) Closed-form expressions for the finite SNR diversity order and the asymptotic diversity order at high SNR were derived. (5) Monte Carlo simulations were conducted to verify the correctness of the derived results. Theory analysis and simulation experiments show that the transmission stability of the system can be significantly improved by increasing the number of emitting light sources. Moreover, when the product of the number of transmitting light sources and RIS blocks was constant, the system achieved the same asymptotic diversity order.

**Key words:** UWOC, RIS, ocean turbulence, optimal selection

## 0 引言

在海洋开发和海事应用的多个场景中,如海洋环境监测、海洋数据收集、海底天然气和天然矿物勘探、港口和航运安全等,都需要水下无线通信<sup>[1-3]</sup>。水下无线通信主要有3种实现方案:水下声通信、水下射频通信和水下无线光通信(underwater wireless optical communication, UWOC)<sup>[4]</sup>。

虽然声波信号能以较小的信号衰减进行长距离传播,但其带宽一般较低(通常为kbit/s左右)、时延高、指向性差,而且可能会影响海洋生物。射频信号支持较高的数据传输速率(通常在Mbit/s量级),功耗低,但通信距离较短,信号衰减大。与水下声通信和射频通信相比,UWOC具有较低的链路时延、较高的传输速率(通常在Gbit/s量级)和较低的实施成本,尤其适用于高速和大容量的水下数据传输<sup>[1,3]</sup>。

UWOC系统要求发射光源和接收探测器必须对准。考虑UWOC的高传输速率,即使是短时间的阻塞或遮挡也会造成突然的通信中断,从而导致大量传输信息的丢失。在水下环境中,海洋动植物、海山、海上平台设备等都会遮挡或阻断光源与探测器之间的光链路,增加光信息丢失的可能性。可重构智能表面(reconfigurable intelligent

surface, RIS)这一新兴技术为减少障碍物和阻塞对水下无线光链路的不利影响打开了大门。

RIS是一项革命性的技术,最初用于射频通信链路。具体来说,RIS是一个超平面,包括多个低成本无源反射元件,每个元件都能独立控制入射信号的振幅和/或相位变化,通过软件控制反射来重新配置无线传播环境<sup>[5]</sup>。用于光通信的RIS与用于射频通信的RIS不同。光信号RIS的硬件实现可分为3大类,即基于元表面的RIS、基于镜面阵列的RIS和基于液晶的RIS<sup>[6-7]</sup>。

目前,光信号RIS主要用于室内可见光通信(visible light communications, VLC)和自由空间光通信(free space optical communications, FSOC)。例如,考虑到基于元表面和基于镜面阵列的RIS模型,文献[8]利用辐射测量概念研究了基于RIS的室内可见光信道的时延特性。文献[9]提出了系统稀疏信道模型及级联信道的完整信道状态信息(channel state information, CSI),进一步进行了RIS-VLC系统室内定位研究。文献[10]致力于研究RIS对VLC系统的影响,并为RIS辅助的VLC系统提出了一种联合资源管理方法,以最大限度地提高整体频谱效率。文献[11]研究了具有多个合法用户和一个窃听者的RIS辅助VLC系统中的物理层安全性。在文献[12]中,为了增加通信覆



盖范围和提高系统性能，在考虑了大气湍流和指向误差的FSOC设置中考虑了RIS。考虑到RIS位置的链路距离和抖动比，文献[13]对RIS辅助FSOC链路进行了性能分析。文献[14]提出了一种基于光RIS的可控多分支FSOC系统，并推导出了渐近平均误码率和中断概率。文献[15]对多RIS辅助的FSOC系统进行了性能分析，并探讨了从多个可用RIS中选择最佳RIS的方案下系统符号错误率（symbol error rate, SER）性能。

尽管学术界和产业界已经对RIS辅助的VLC和FSOC系统进行了很多研究，但对RIS辅助水下通信系统的关注仍相对不足。文献[16]提出了一种水下通信方案：信号通过多跳方式传输至海面，由高空平台搭载的RIS辅助反射后传回水下。该方案将水下湍流建模为广义Gamma信道，海面以上的自由空间光链路建模为考虑指向误差的Gamma-Gamma信道。文献[17]研究透射反射可重构智能表面（simultaneous transmission and reflection-reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS）辅助的水下光通信，利用其透射和反射能力服务位于RIS不同侧（包括传统反射无法覆盖区域）的多用户。文献[18]通过RIS增强的射频链路、FSOC链路和UWOC链路协同工作，实现从基站到水下航行器的可靠数据传输。文献[19]提出了一种RIS辅助的双跳混合RF-UWOC系统，但在射频链路中使用了RIS。文献[20]则将RIS的概念引入UWOC链路，并应用中心极限定理进行性能评估。文献[21]研究了在对数正态信道下，基于RIS的UWOC系统的中断概率，并显示在水下环境中，海洋湍流对UWOC系统的性能有很大的影响。

湍流是指水下环境中由温度和盐度波动引起的折射率快速波动，并导致信道衰落。文献[22]和文献[26]对水下湍流信道衰落的统计分布进行了实验研究。对数正态和Gamma-Gamma概率密度函数（probability density function, PDF）分别与弱湍流和中/强湍流的测量结果相匹配<sup>[22-23,26]</sup>。

VLC中未考虑湍流衰落<sup>[8-11]</sup>，因此VLC的结果不适用于UWOC系统。

除了RIS辅助通信，增加发射机数量也是提高通信质量的有效方法。为了有效降低海洋湍流对光信号的衰减效应，研究者们提出了发射激光选择（transmit laser selection, TLS）技术<sup>[27-29]</sup>。在典型的TLS系统中，发射机配备有多个激光源，并且在一个信令周期内仅选择一个光源处于活动状态来传输信号，而其余光源保持静默。与多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）技术相比，TLS技术有效避免了信道相关性高的问题，且显著降低了系统复杂度<sup>[27]</sup>。此外，也有研究者们考虑选择具有最高瞬时接收信噪比（signal-to-noise ratio, SNR）的光源（最佳光源）用来传输信号<sup>[27-30]</sup>，但是均未考虑直射链路被遮挡的情况。

在实际海洋环境中，收发器会因为洋流和波浪而产生相对位移，从而导致瞄准误差。文献[31]在Lognormal弱海洋湍流和瞄准误差下，研究了垂直链路的中断概率。文献[32]建模了一个随机海面模型，研究了海面起伏下垂直浮标系统的性能。文献[33]研究了链路失准下的UWOC垂直链路参数优化。文献[34]将垂直UWOC应用到海洋石油钻机物联网视频传输系统。然而，文献[31]仅考虑了弱海洋湍流，文献[32~34]未考虑海洋湍流的影响。

在上述背景下，本文考虑水下水平湍流信道对UWOC系统的影响，提出了RIS辅助的最优发射激光选择（optimal transmit laser selection, OTLS）光通信系统。本文基于Meijer G函数和Gauss超几何函数，推导了RIS辅助下OTLS系统的中断概率的闭式表达式，并且给出高SNR下的中断概率渐近分析，得到了系统的分集阶闭式表达式。

## 1 系统模型

RIS辅助的最优选择UWOC系统示意图如图1所示，该系统由光源、光RIS和接收机组成。由

于鱼群、潜艇和海山等障碍物的存在，假定光源和接收机之间的视线（line of sight, LOS）链路（即直接链路）被阻断，但通信可以通过 RIS 进行。RIS 可以模拟放置在海面礁石底部或固定在货船底部，为信号源和目的地之间提供丰富的非视线（non line of sight, NLOS）链路。在发射机处，设置了  $T$  个光源，接收机估算信道衰减系数，从而确定瞬时接收信噪比值，并选择信道系数最大的最佳发射光源的索引，通过声波信号反馈给发射端，发射器则相应地切换到最佳光源。在理想情况下，最佳光源是衰减系数值最低的光源。

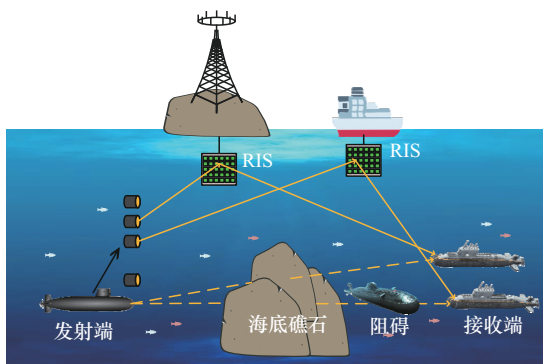


图1 RIS 辅助的最优选择 UWOC 系统示意图

### 1.1 信道模型

目前，用于光通信的 RIS 有 3 种类型，即元表面 RIS、镜面阵列 RIS 和液晶 RIS。作为光接收器的组成部分，液晶型 RIS 无法改变光通道路径，它主要用于短距离 VLC 系统，不适合本文考虑的场景。本文考虑采用强度调制和直接检测（intensity modulation and direct detection, IM-DD）的无线光通信，并采用镜面阵列 RIS 辅助信号传输。

RIS 由  $N$  个反射元件组成。影响接收机接收光信号的因素包括水下路径损耗、湍流信道衰减以及发射机和 RIS 抖动造成的指向误差。因此，任意一个光源和接收机之间的信道衰落系数都可以建模为：

$$h = \sum_{n=1}^N h_{ln} h_{ln} h_{pn} \rho_n = \sum_{n=1}^N h_l^{sr_n} h_l^{r_n d} h_l^{sr_n} h_l^{r_n d} h_{pn} \rho_n \quad (1)$$

其中， $h_{ln}$ 、 $h_{ln}$  和  $h_{pn}$  分别表示从任一光源到接收机的路径经过第  $n$  个反射元件时的路径损耗、水下湍流信道衰落系数和由指向误差引起的信道衰落系数； $\rho_n \in [0, 1]$  表示第  $n$  个反射元件的反射系数； $h_l^{sr_n}$  和  $h_l^{r_n d}$  分别表示从任一光源到第  $n$  个反射元件和从第  $n$  个反射元件到接收机的水下湍流信道衰落； $h_l^{sr_n}$  和  $h_l^{r_n d}$  分别表示从任一光源到第  $n$  个反射元件和从第  $n$  个反射元件到接收机的路径损耗。

#### 1.1.1 路径损耗

在水下环境中，路径损耗是光信号的传播衰减，主要由海水中的各种成分（包括水分子、浮游植物、非色素悬浮颗粒和有色溶解有机物）的吸收和散射效应引起。在此采用比尔-朗伯定律的指数衰减模型来近似估计路径损耗，但该模型忽略了多重散射效应<sup>[31]</sup>。

根据比尔-朗伯定律，可得， $h_l^i = \exp(-cL_i)$ ， $i \in \{sr_n, r_n d\}$ ，其中  $c$  为消光系数，是吸收系数和散射系数之和。在固定波长和稳定的水质环境下， $c$  是一个常数。 $L_{sr_n}$  和  $L_{r_n d}$  分别为从任一光源到第  $n$  个反射元件与从第  $n$  个反射元件到接收机的链路距离。由于 RIS 尺寸远小于通信距离，RIS 通常由密集排列的小型反射单元（厘米级）组成，而水下光通信距离一般为米至百米级，反射元件之间的距离远小于链路距离，因此，对于具有  $N$  块反射元件的 RIS，光源到达 RIS 上每一块反射元件时便会产生的路径损耗，在此可以认为任一光源到  $N$  个反射元件的链路距离是相同的，即  $L_{sr_n} = L_1$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ 。同样，经过 RIS 辅助通信的光信号从每一块反射元件到达接收机时也会产生路径损耗，在此也可以认为任一块反射元件到达接收机的链路距离是相同的， $L_{r_n d} = L_1$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ 。因此， $N$  条路径的路径损耗系数被认为是相同的，可以有：

$$h_{ln} = h_l^{sr_n} h_l^{r_n d} = \exp[-c(L_{sr_n} + L_{r_n d})] =$$



$$\exp[-c(L_1+L_2)] = h_l, n=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

### 1.1.2 水下湍流

由于光源到达 RIS 上任意一块反射元件与任意一块反射元件到达接收机所经历的海底湍流可视为相同的，因此可以使用  $h_m = h_t^{sr_n} h_t^{r_n d}$  表示任一光源经过第  $n$  个反射元件到接收机的级联湍流信道衰落系数。 $h_t^{sr_n}$  和  $h_t^{r_n d}$  采用 Gamma 分布，其 PDF 可表示为<sup>[36]</sup>：

$$f_{h_t^{sr_n}}(h_t^{sr_n}) = \frac{\alpha (a h_t^{sr_n})^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-a h_t^{sr_n}) \quad (3)$$

$$f_{h_t^{r_n d}}(h_t^{r_n d}) = \frac{\beta (b h_t^{r_n d})^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta h_t^{r_n d}) \quad (4)$$

其中， $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数， $\alpha$  和  $\beta$  分别为从光源到 RIS 和从 RIS 到接收机的湍流参数。

通过固定  $h_t^{sr_n}$  和使用变量的变化，可以得到  $h_t^{r_n d} = h_m / h_t^{sr_n}$ ，其条件 PDF 可以通过如下计算式获得：

$$f(h_m / h_t^{sr_n}) = \frac{\beta (\beta h_m / h_t^{sr_n})^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp\left(-\frac{\beta h_m}{h_t^{sr_n}}\right) \quad (5)$$

然后， $h_m$  的 PDF 可以表示为：

$$f_{h_m}(h_m) = \int_0^\infty f(h_m / h_t^{sr_n}) f_{h_t^{sr_n}}(h_t^{sr_n}) dh_t^{sr_n} = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_m^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_m}) \quad (6)$$

其中， $K_p(\cdot)$  是阶数为  $p$  的修正贝塞尔函数，在此处  $p = \alpha - \beta$ 。

在表达式 (6) 中，可以得出，任一光源通过第  $n$  个反射元件（即  $h_m$ ）到接收机的级联湍流信道的衰减系数由 Gamma-Gamma 分布建模。假设  $h_{11}, h_{12}, \dots, h_m, \dots, h_{1N}$  是独立且同分布的。在高斯光束传播假设下，湍流参数  $\alpha$  和  $\beta$  的计算式如下<sup>[37]</sup>：

$$\alpha = \left[ \exp\left(\frac{0.17\sigma_{l_1}^2}{(1+1.67\sigma_{l_1}^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\beta = \left[ \exp\left(\frac{0.225\sigma_{l_2}^2}{(1+0.259\sigma_{l_2}^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

其中， $\sigma_{l_i}^2$ ， $i=1, 2$  为闪烁参数<sup>[38]</sup>。

### 1.1.3 指向误差

在 RIS 辅助的 UWOC 系统中， $h_{pn}$  是由任一光源通过第  $n$  个反射元件到接收机的路径指向误差引起的信道衰落系数，它受到光束抖动和 RIS 抖动的影响<sup>[14]</sup>。光束因光源处的抖动而振动，RIS 抖动是指由 RIS 的抖动引起的反射表面的法向矢量偏转。由于 RIS 的尺寸远小于通信链路距离，且在此通过传输光束与接收平面的偏移来计算系统的指向误差，因此经过每一块反射元件辅助的光信号均可视为它们的指向误差相同。可以得到：

$$h_{pn} = h_p, n=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

用式 (10) 来近似  $h_p$ <sup>[39]</sup>：

$$h_p \approx A_0 \exp\left(-\frac{2R^2}{\omega_{z_{eq}}^2}\right), R \geq 0 \quad (10)$$

根据文献[14]中的指向误差模型， $h_p$  的 PDF 可以表示为：

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\xi^2}{A_0^2} h_p^{\xi^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (11)$$

其中，

$$\xi = \sqrt{\frac{\omega_{z_{eq}}^2}{4\sigma_\theta^2(L_1+L_2)^2 + 16\sigma_\phi^2 L_2^2}} \quad (12)$$

$A_0 = [\text{erf}(v_0)]^2$  是  $R=0$  时的采集功率分数， $R$  是接收器的指向误差径向位移。 $\sigma_\theta^2$  和  $\sigma_\phi^2$  分别是指向误差角和偏转误差角的方差。 $\omega_{z_{eq}}$  是等效射束宽度，可由式 (13) 计算：

$$\omega_{z_{eq}} = \omega_z \sqrt{\frac{\sqrt{\pi} \text{erf}(v_0)}{2v_0 \exp(-v_0^2)}} \quad (13)$$

其中， $\text{erf}(\cdot)$  是误差函数， $v_0 = \sqrt{\pi/2} D_R / \omega_z$ 。接

收机处光束的偏移如图2所示,  $D_R$  是接收器孔径半径,  $\omega_z$  是波束宽度。

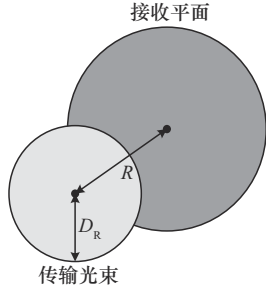


图2 接收机处光束的偏移

## 2 系统性能分析

### 2.1 瞬时信噪比

假设所有 RIS 反射元件具有相同的反射系数, 即  $\rho_n = \rho$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , 任一光源到达接收机的接收瞬时 SNR 可以表示为:

$$\gamma = \frac{P_{te} \left( \sum_{n=1}^N h_{ln} h_{ln} h_{pn} \rho_n \right)^2}{\sigma^2} = \frac{P_{te} \rho^2 h_l^2 h_p^2 \left( \sum_{n=1}^N h_{ln} \right)^2}{\sigma^2} = \bar{\gamma} h_p^2 \left( \sum_{n=1}^N h_{ln} \right)^2 = \bar{\gamma} h_p^2 h_t^2 \quad (14)$$

其中, 路径损耗  $h_l$  是确定的, 而  $h_p$  和  $h_t$  则是随机衰减变量。因此, 让  $P_{te} \rho^2 h_l^2 / \sigma^2$  表示无衰落信噪比, 即平均信噪比<sup>[40-41]</sup>。镜面阵列 RIS 的反射元件间距远大于波长 (530 nm) 时, 可通过将  $N$  个反射链路假设为独立同分布, 在此  $h_t = \sum_{n=1}^N h_{ln}$  表示独立同分布的 Gamma-Gamma 随机变量之和。对于  $N$  个独立同分布的 Gamma-Gamma 随机变量之和, 即  $Y = \sum_{n=1}^N X_n$ , 其中  $X_n \sim \Gamma\Gamma(\alpha_x, \beta_x, \Omega_x)$  ( $\Gamma\Gamma(\cdot)$  表示 Gamma-Gamma 分布), 可以用另一个带参数  $(\alpha_y, \beta_y, \Omega_y)$  的 Gamma-Gamma 随机变量来精确逼近<sup>[42]</sup>:

$$\alpha_y = g\alpha_x, \beta_y = g\beta_x, \Omega_y = N\Omega_x \quad (15)$$

$$g = N \left( 1 + \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=n+1}^N \mu_{nm} \right)^{-1} \quad (16)$$

其中,  $\mu_{nm}$  是  $X_n$  和  $X_m$  的相关系数。

由于  $h_{l1}, h_{l2}, \dots, h_{lm}, \dots, h_{lN}$  是独立且同分布的, 因此  $h_{ln}$  与  $h_{lm}$  之间的相关系数为 0, 可得  $h_{ln} \sim \Gamma\Gamma(\alpha, \beta, 1)$ 。因此, 得到:

$$h_t = \sum_{n=1}^N h_{ln} \sim \Gamma\Gamma(\alpha_h, \beta_h, N) \quad (17)$$

其中,  $\alpha_h = N\alpha$ ,  $\beta_h = N\beta$ 。

$h_t$  的 PDF 可以表示为:

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{2 \left( \frac{\alpha_h \beta_h}{N} \right)^{\frac{\alpha_h + \beta_h}{2}}}{\Gamma(\alpha_h) \Gamma(\beta_h)} h_t^{\frac{\alpha_h + \beta_h}{2} - 1} K_{\alpha_h - \beta_h} \left( 2 \sqrt{\frac{\alpha_h \beta_h}{N}} h_t \right) \quad (18)$$

为了便于后续计算, 使用文献[43]中的计算式在文献[38]中将计算式 (18) 中的贝塞尔函数重写为:

$$K_{\alpha_h - \beta_h} \left( 2 \sqrt{\frac{\alpha_h \beta_h}{N}} h_t \right) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left( \frac{\alpha_h \beta_h}{N} h_t \left| \frac{\alpha_h - \beta_h}{2}, \frac{\beta_h - \alpha_h}{2} \right. \right) \quad (19)$$

其中,  $G_{p,q}^{m,n}(\cdot | \cdot)$  为 Meijer-G 函数。将式 (19) 代入式 (18), 得到:

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{\alpha_h \beta_h}{N \Gamma(\alpha_h) \Gamma(\beta_h)} \left( \frac{\alpha_h \beta_h}{N} h_t \right)^{\frac{\alpha_h + \beta_h}{2} - 1} G_{0,2}^{2,0} \left( \frac{\alpha_h \beta_h}{N} h_t \left| \frac{\alpha_h - \beta_h}{2}, \frac{\beta_h - \alpha_h}{2} \right. \right) \quad (20)$$

然后, 利用文献[43]中 Meijer-G 函数的性质, 可以得到:

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{\alpha_h \beta_h}{N \Gamma(\alpha_h) \Gamma(\beta_h)} G_{0,2}^{2,0} \left( \frac{\alpha_h \beta_h}{N} h_t \left| \alpha_h - 1, \beta_h - 1 \right. \right) \quad (21)$$

假设  $h = h_p h_t$  表示联合信道衰减系数, 则  $h$  的 PDF 计算式为:



$$f_h(h) = \int_0^{A_0} f_{h_p}(h_p) f_{h|h_p}(h|h_p) dh_p = \int_0^{A_0} \frac{1}{h_p} f_{h_p}(h_p) f_{h|h_p}\left(\frac{h}{h_p}\right) dh_p \quad (22)$$

将式 (11) 和式 (21) 代入式 (22), 可以得到:

$$f_h(h) = \frac{\alpha_h \beta_h \zeta^2}{N\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)A_0^{\zeta^2}} \int_0^{A_0} h_p^{\zeta^2-2} G_{0.2}^{2.0}\left(\frac{\alpha_h \beta_h h}{Nh_p} \middle| \begin{matrix} \dots \\ \alpha_h-1, \beta_h-1 \end{matrix}\right) dh_p \quad (23)$$

对于式 (23) 中的 Meijer-G 函数, 变量  $h_p$  出现在分母处。为了得到分母变量  $h_p$  的 Meijer-G 函数, 可以利用文献[43]中计算式所示的 Meijer-G 函数的反射特性, 得到:

$$G_{0.2}^{2.0}\left(\frac{\alpha_h \beta_h h}{Nh_p} \middle| \begin{matrix} \dots \\ \alpha_h-1, \beta_h-1 \end{matrix}\right) = G_{2.0}^{0.2}\left(\frac{Nh_p}{\alpha_h \beta_h h} \middle| \begin{matrix} 2-\alpha_h, 2-\beta_h \\ \dots \end{matrix}\right) \quad (24)$$

将式 (24) 代入式 (23), 即可得:

$$f_h(h) = \frac{\alpha_h \beta_h \zeta^2}{N\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)A_0^{\zeta^2}} \int_0^{A_0} h_p^{\zeta^2-2} G_{2.0}^{0.2}\left(\frac{Nh_p}{\alpha_h \beta_h h} \middle| \begin{matrix} 2-\alpha_h, 2-\beta_h \\ \dots \end{matrix}\right) dh_p \quad (25)$$

然后, 借助文献[43]中的计算式求解积分, 并应用 Meijer-G 函数的反射特性, 得到一个以分子为变量  $h$  的 Meijer-G 函数。

$$f_h(h) = \frac{\alpha_h \beta_h \zeta^2}{NA_0\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} G_{1.3}^{3.0}\left(\frac{\alpha_h \beta_h h}{NA_0} \middle| \begin{matrix} \zeta^2 \\ \zeta^2-1, \alpha_h-1, \beta_h-1 \end{matrix}\right) \quad (26)$$

基于  $f_h(h)$ , 瞬时 SNR  $\gamma = \bar{\gamma}h^2$  的 PDF 可以表示为:

$$f_\gamma(\gamma) = f_h\left(\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}\right) \left| \frac{dh}{d\gamma} \right| = f_h\left(\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}\right) \left( \frac{1}{2\sqrt{\bar{\gamma}\gamma}} \right) \quad (27)$$

将式 (26) 代入式 (27),  $f_\gamma(\gamma)$  的封闭式表达为:

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{\alpha_h \beta_h \zeta^2}{2NA_0\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)\sqrt{\gamma\bar{\gamma}}} G_{1.3}^{3.0}\left(\frac{\alpha_h \beta_h}{NA_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} \zeta^2 \\ \zeta^2-1, \alpha_h-1, \beta_h-1 \end{matrix}\right) \quad (28)$$

根据文献[43]中的计算式, 瞬时 SNR 的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 为:

$$F_\gamma(\gamma) = \frac{\zeta^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} G_{2.4}^{3.1}\left(\frac{\alpha_h \beta_h}{NA_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} 1, \zeta^2+1 \\ \zeta^2, \alpha_h, \beta_h, 0 \end{matrix}\right) \quad (29)$$

$T$  个光源中的最佳光源的 SNR 的概率密度函数为<sup>[44]</sup>:

$$f_{\gamma_{\max}}(\gamma_{\max}) = T [F_\gamma(\gamma_{\max})]^{T-1} f_\gamma(\gamma_{\max}) \quad (30)$$

记为

$$\Psi_1(\gamma) = G_{1.3}^{3.0}\left(\frac{\alpha_h \beta_h}{NA_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} \zeta^2 \\ \zeta^2-1, \alpha_h-1, \beta_h-1 \end{matrix}\right) \quad (31)$$

$$\Psi_2(\gamma) = G_{2.4}^{3.1}\left(\frac{\alpha_h \beta_h}{NA_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} 1, \zeta^2+1 \\ \zeta^2, \alpha_h, \beta_h, 0 \end{matrix}\right) \quad (32)$$

将式 (28)、式 (29)、式 (31) 和式 (32) 代入式 (30) 后可得:

$$f_{\gamma_{\max}}(\gamma_{\max}) = T \left[ \frac{\zeta^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \Psi_2(\gamma_{\max}) \right]^{T-1} \frac{\alpha_h \beta_h \zeta^2}{2NA_0\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)\sqrt{\gamma_{\max}\bar{\gamma}}} \Psi_1(\gamma_{\max}) \quad (33)$$

整理后可得最佳信噪比  $\gamma_{\max}$  的概率密度函数的封闭计算式为:

$$f_{\gamma_{\max}}(\gamma_{\max}) = \frac{T\alpha_h \beta_h \zeta^{2T}}{2NA_0[\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)]^T \sqrt{\gamma_{\max}\bar{\gamma}}} [\Psi_2(\gamma_{\max})]^{T-1} \Psi_1(\gamma_{\max}) \quad (34)$$

## 2.2 中断概率

由于水下光湍流信道的相干时间较长 ( $10^{-5} \sim 10^{-2}$  s)<sup>[45]</sup>, 因此具有准静态特性<sup>[46]</sup>。对于数百兆比特每秒的典型传输速率, 衰减在数千个连续比特甚至更多比特上保持不变。因此, 通

信链路可能会因深度衰落而暂时中断。对于准静态信道，中断概率是比误码率更合适的性能指标<sup>[46]</sup>。

中断概率被定义为瞬时 SNR  $\gamma$  低于阈值 SNR  $\gamma_{th}$  的概率：

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_{max}}(\gamma_{max}) d\gamma_{max} \quad (35)$$

将式 (34) 代入式 (35)，即可得：

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} \frac{T\alpha_h\beta_h\xi^{2T}}{2NA_0[\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)]^T\sqrt{\gamma_{max}\bar{\gamma}}} [\Psi_2(\gamma_{max})]^{T-1} \Psi_1(\gamma_{max}) d\gamma_{max} \quad (36)$$

通过改变积分对象，可以化为：

$$P_{out} = \frac{T\xi^{2T}}{[\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)]^T} [\Psi_2(\gamma_{max})]^{T-1} \Psi_1(\gamma_{max}) d\left(\frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0}\sqrt{\frac{\gamma_{max}}{\bar{\gamma}}}\right) \quad (37)$$

由文献[43]中的计算式，有：

$$\int \Psi_1(\gamma_{max}) d\left(\frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0}\sqrt{\frac{\gamma_{max}}{\bar{\gamma}}}\right) = \Psi_2(\gamma_{max}) \quad (38)$$

将式 (38) 代入式 (37)，可得中断概率的封闭计算式为：

$$P_{out} = \left[ \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} G_{2,4}^{3,1} \left( \frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} 1, \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha_h, \beta_h, 0 \end{matrix} \right) \right]^T \quad (39)$$

### 2.3 分集阶与渐近分集阶

本节考虑有限信噪比分集阶、高信噪比下的渐近分集阶。虽然早期研究中提出的渐近分析对于理解最大分集阶非常重要，但在实际信噪比范围内，这种分集阶可能并不存在。此外，在有限信噪比值范围内，具有相同渐近分集阶的不同系统可能具有不同的分集增益。这些都要求对有限信噪比分集增益进行分析。

分集阶数是双对数尺度上中断概率曲线的负斜率，它决定了中断概率随 SNR 变化的速度。有限 SNR 分集阶数定义为<sup>[46]</sup>：

$$D_O(\bar{\gamma}) = -\frac{\partial \ln P_{out}(\bar{\gamma})}{\partial \ln \bar{\gamma}} = -\frac{\bar{\gamma}}{P_{out}(\bar{\gamma})} \cdot \frac{\partial P_{out}(\bar{\gamma})}{\partial \bar{\gamma}} \quad (40)$$

对式 (40) 求导，可得：

$$\frac{\partial P_{out}(\bar{\gamma})}{\partial \bar{\gamma}} = \frac{\partial \left[ \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \Psi_2(\gamma_{th}) \right]^T}{\partial \left( \frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} \right)} \quad (41)$$

$$\left( -\frac{1}{2} \right) \frac{\alpha_h\beta_h\sqrt{\gamma_{th}}}{NA_0} \bar{\gamma}^{-\frac{3}{2}}$$

由文献[43]中的计算式，得：

$$\frac{\partial \Psi_2(\gamma_{th})}{\partial \frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}} = \frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \quad (42)$$

$$G_{3,5}^{3,2} \left( \frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} 0, 1, \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha_h, \beta_h, 1, 0 \end{matrix} \right)$$

记：

$$\Psi_3(\gamma_{th}) = G_{3,5}^{3,2} \left( \frac{\alpha_h\beta_h}{NA_0}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} 0, 1, \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha_h, \beta_h, 1, 0 \end{matrix} \right) \quad (43)$$

将式 (42) 代入式(41)，得：

$$\frac{\partial P_{out}(\bar{\gamma})}{\partial \bar{\gamma}} = \left( -\frac{1}{2} \right) \frac{\alpha_h\beta_h\xi^2\sqrt{\gamma_{th}}}{NA_0\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \bar{\gamma}^{-\frac{3}{2}} \frac{TNA_0\sqrt{\bar{\gamma}}}{\alpha_h\beta_h\sqrt{\gamma_{th}}} \quad (44)$$

$$\left[ \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \Psi_2(\gamma_{th}) \right]^{T-1} \Psi_3(\gamma_{th})$$

化简可得：

$$\frac{\partial P_{out}(\bar{\gamma})}{\partial \bar{\gamma}} = -\frac{T\xi^2\bar{\gamma}^{-1}}{2\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \quad (45)$$

$$\left[ \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \Psi_2(\gamma_{th}) \right]^{T-1} \Psi_3(\gamma_{th})$$

将式 (45) 代入式 (40)，得：

$$D_O(\bar{\gamma}) = -\frac{\bar{\gamma}}{P_{out}(\bar{\gamma})} \cdot \frac{\partial P_{out}(\bar{\gamma})}{\partial \bar{\gamma}} = \frac{-\bar{\gamma} \frac{T\xi^2\bar{\gamma}^{-1}}{2\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \left[ \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \Psi_2(\gamma_{th}) \right]^{T-1} \Psi_3(\gamma_{th})}{\left[ \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha_h)\Gamma(\beta_h)} \Psi_2(\gamma_{th}) \right]^T} \quad (46)$$



化简后的分集阶的封闭计算式为：

$$D_o(\bar{\gamma}) = \frac{T}{2} \cdot \frac{G_{3,5}^{3,2} \left( \frac{\alpha_h \beta_h}{NA_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} 0, 1, \zeta^2 + 1 \\ \zeta^2, \alpha_h, \beta_h, 1, 0 \end{matrix} \right)}{G_{2,4}^{3,1} \left( \frac{\alpha_h \beta_h}{NA_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \middle| \begin{matrix} 1, \zeta^2 + 1 \\ \zeta^2, \alpha_h, \beta_h, 0 \end{matrix} \right)} \quad (47)$$

接下来，考虑高 SNR 下的渐近分集阶数 (asymptotical diversity order, ADO)，将其定义为：

$$A_{DO} = D_o(\bar{\gamma}) = - \frac{\partial \ln \left[ P_{\text{out}}(\bar{\gamma}) \right]}{\partial \ln \bar{\gamma}} \quad (48)$$

在高 SNR 假设下，即  $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ ，式 (39) 中 Meijer-G 函数的内参数归零，即  $\alpha_h \beta_h \sqrt{\gamma_{th}} / NA_0 \sqrt{\bar{\gamma}} \rightarrow 0$ 。然后，应用文献[43]中的计算式和

$$P_{\text{out}}(\bar{\gamma}) = \left[ \bar{\gamma}^{-\frac{\min\{\mathbf{d}\}}{2}} \frac{\zeta^2 (\alpha_h \beta_h \sqrt{\gamma_{th}})^{\min\{\mathbf{d}\}} \prod_{\substack{j=1 \\ b_j \neq \min\{\mathbf{d}\}}}^3 \Gamma(b_j - \min\{\mathbf{d}\}) \cdot \Gamma(\min\{\mathbf{d}\})}{\Gamma(\alpha_h) \Gamma(\beta_h) (NA_0)^{\min\{\mathbf{d}\}} \Gamma(1 + \min\{\mathbf{d}\}) \Gamma(1 + \zeta^2 - \min\{\mathbf{d}\})} \right]^T \quad (53)$$

其中， $\mathbf{d} = [\zeta^2, \alpha_h, \beta_h]$ ，将式 (53) 代入式 (48)，可以得到渐近分集阶的计算式：

$$A_{DO} = \frac{T}{2} \min\{\zeta^2, \alpha_h, \beta_h\} = \frac{T}{2} \min\{\zeta^2, N\alpha, N\beta\} \quad (54)$$

其中， $\min(\cdot)$  表示最小值。

### 3 仿真结果

本节将通过蒙特卡罗模拟验证所得出的闭式表达式的正确性。除非另有说明，否则赋值阈值信噪比  $\gamma_{th} = 10$  dB，探测器孔径  $D_R = 5$  cm，噪声方差  $\sigma_n^2 = -100$  dB，反射元件反射系数  $\rho = 1$ ，消光系数  $c = 15 \text{ m}^{-1}$ ，波长  $\lambda = 530$  nm，链路距离  $L_1 = L_2 = 15$  m，均方温度耗散率  $\chi_{T_1} = \chi_{T_2} = 1 \times 10^{-5} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-3[47]}$ ，柯尔莫哥洛夫微尺度长度  $\eta_1 = \eta_2 = 7.5 \times 10^{-5[47]}$ ，单位

Gamma 函数的递归特性，Meijer-G 函数可以展开为多项式之和的形式。记  $z = \alpha_h \beta_h \sqrt{\gamma_{th}} / NA_0 \sqrt{\bar{\gamma}}$ ，有：

$$P_{\text{out}}(\bar{\gamma}) = \left[ \frac{\zeta^2}{\Gamma(\alpha_h) \Gamma(\beta_h)} \left( z^{\zeta^2} C_1 + z^{\alpha_h} C_2 + z^{\beta_h} C_3 \right) \right]^T \quad (49)$$

其中，

$$C_1 = \frac{\Gamma(\alpha_h - \zeta^2) \Gamma(\beta_h - \zeta^2) \Gamma(\zeta^2)}{\Gamma(1 + \zeta^2) \Gamma(1)} \quad (50)$$

$$C_2 = \frac{\Gamma(\zeta^2 - \alpha_h) \Gamma(\beta_h - \alpha_h) \Gamma(\alpha_h)}{\Gamma(1 + \zeta^2 - \alpha_h) \Gamma(1 + \alpha_h)} \quad (51)$$

$$C_3 = \frac{\Gamma(\zeta^2 - \beta_h) \Gamma(\alpha_h - \beta_h) \Gamma(\beta_h)}{\Gamma(1 + \zeta^2 - \beta_h) \Gamma(1 + \beta_h)} \quad (52)$$

当  $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$  时， $\bar{\gamma}$  的最高阶项主导中断概率，因此可以忽略低阶项，式 (49) 可以简化为：

质量流体动能耗散率  $\varepsilon_1 = 3 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$  和  $\varepsilon_1 = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3[47]}$ 。根据这些参数，湍流参数设置为  $\alpha = 4.37$  和  $\beta = 1.24$ 。

固定发射光源的数量为  $T = 3$ ，考虑反射元件的数目  $N = 2, 4, 6$  时，分析中断概率的变化情况。发射光源一定时 RIS 块数与中断概率的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出，推导出的闭式表达式 (30) 的分析结果与仿真结果一致，这验证了推导的准确性。从图 3 中可以看出，中断概率随着 RIS 反射元件数量的增加而减小。例如， $N = 2$  时，需要瞬时 SNR 为  $\bar{\gamma} = 19$  dB，以实现中断概率  $P_{\text{out}} = 10^{-4}$ 。当  $N = 4$  和  $N = 6$  时，瞬时 SNR 分别降低到 7.5 dB 和 2.4 dB。从图 3 中还可以看出，当 RIS 块数达到一定数量时，UWOC 系统的中断

概率性能得到显著改善，中断概率随着 RIS 块数的增加而逐渐降低。

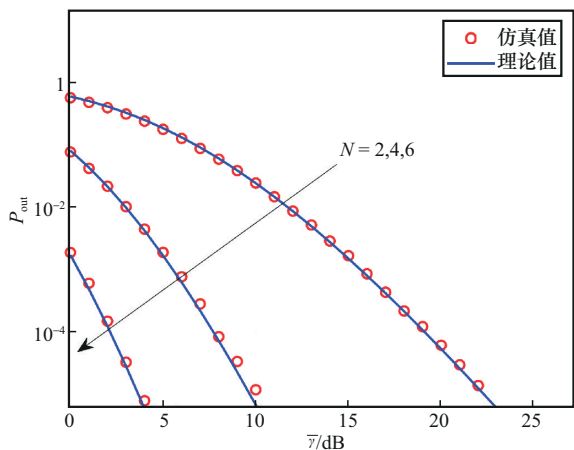


图3 发射光源一定时 RIS 块数与中断概率的关系

固定反射元件数目为  $N=2$ ，考虑发射光源数为  $T=1, 3, 5, 7, 9$  时中断概率的变化情况，得到 RIS 块数一定时发射光源数量与中断概率的关系，如图 4 所示。其中， $T=1$  时为无选择的情况。从图 4 中可以看出，推导出的闭式表达式中的分析结果与仿真结果一致，这验证了推导的准确性。相比于单个发射光源，在多个发射光源中选择最佳发射光源能够显著提高系统性能。 $T=1$ 、 $\bar{\gamma}=25$  dB 的情况下，中断概率仅为  $P_{out}=10^{-2}$ 。当  $T=3$ 、 $T=5$ 、 $T=7$ 、 $T=9$ ， $\bar{\gamma}$  分别为 25 dB、17 dB、14 dB、12 dB 时，中断概率  $P_{out}=10^{-6}$ 。从图 4 中还可以看出，当发射光源数量达到一定数量时，UWOC 系统的中断概率性能得到显著改善，中断概率随着发射光源数量的增加而逐渐降低。

固定发射光源数量和反射元件数乘积，在不同情况下，绘制 UWOC 系统的分集阶和渐近分集阶，结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出，虽然低  $\bar{\gamma}$  情况下有着不同的分集阶，但随着  $\bar{\gamma}$  的增加，发射光源数量和反射元件数乘积相同的情况的分集阶逐渐相同，趋近于相同的渐近分集阶。由此可得出，当湍流参数固定时，发射光源数量和反射元件数的乘积决定了该系统的分集阶。

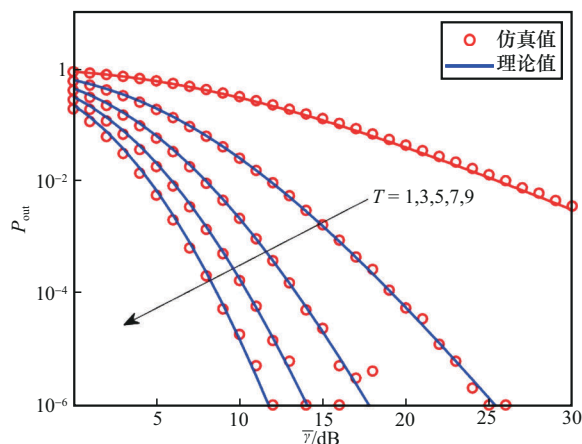


图4 RIS 块数一定时发射光源数量与中断概率的关系

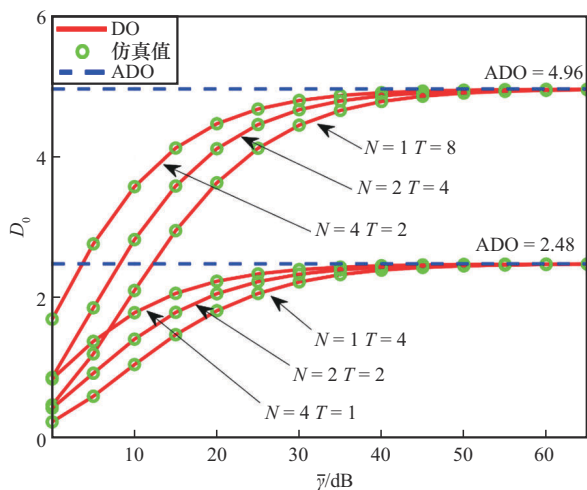


图5 发射光源数量与 RIS 块数乘积相同时 UWOC 系统的分集阶和渐近分集阶

在发射光源数量和反射元件数各不相同的情况下，分别绘制 UWOC 系统的分集阶和渐近分集阶，结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出，发射光源数量一定时，RIS 块数的增多可以成倍地提高分集阶数，而 RIS 块数一定时，每增加 2 个发射光源，分集阶数会提高 4.96，这是由于  $T=1$ ， $N=4$  时，分集阶数为 2.48，增加 2 个发射光源分集阶数便会提高 2 倍。

由图 5 和图 6 结果可得出，可以自由地配置发射光源和 RIS 块数，来有效地提高 UWOC 系统的分集阶数。

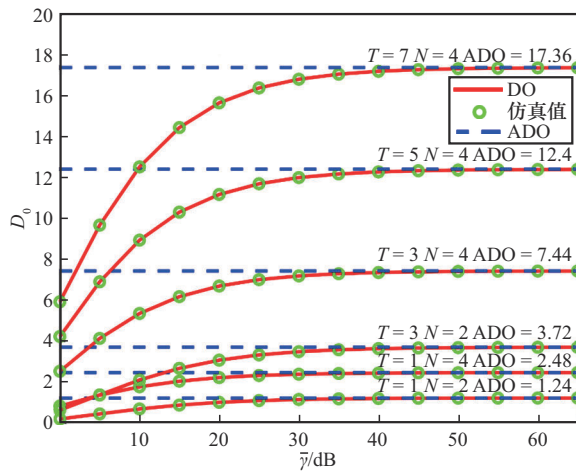


图6 不同情况下 UWOC 系统的分集阶及渐近分集阶

## 4 结束语

本文研究了基于 IM-DD 的 RIS 辅助的最优选择 UWOC 系统。首先，将任一发射光源端到接收端的级联湍流信道衰落系数建模为 Gamma-Gamma 分布，并考虑了波束抖动和 RIS 抖动引起的指向误差。其次，基于 Gamma-Gamma 随机变量之和的近似分布，给出了瞬时接收信噪比的概率密度函数，再通过最优选择得出最佳光源的瞬时接收信噪比的概率密度函数，并推导出了中断概率的闭式表达式。然后，基于中断概率的结果，分析了 UWOC 系统在有限信噪比下的分集阶数和渐近分集阶数。最后，通过仿真实验验证了所得结果的正确性。理论分析和仿真实验结果均表明：增加 RIS 块数和可供选择的发射光源，能够显著提升 UWOC 系统的通信稳定性和性能，并且 RIS 块数和可供选择的发射光源数量共同决定了系统的分集阶数。

## 参考文献：

[1] ZENG Z Q, FU S, ZHANG H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.  
 [2] ALI M F, JAYAKODY D N K, CHURSIN Y A, et al. Recent advances and future directions on underwater wireless communications[J]. Archives of Computational Methods in Engineer-

ing, 2020, 27(5): 1379-1412.  
 [3] 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.  
 [4] CHE X H, WELLSI, DICKERS G, et al. Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(12): 143-151.  
 [5] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 58(1): 106-112.  
 [6] SUN S Y, WANG T J, YANG F, et al. Intelligent reflecting surface-aided visible light communications: potentials and challenges[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2022, 17(1): 47-56.  
 [7] 钱磊, 李东骏, 吴方乾, 等. 基于液晶 RIS 辅助的 VLC 系统物理层安全方法[J]. 光通信技术, 2024, 48(5): 41-45.  
 QIAN L, LI D J, WU F Q, et al. Physical layer security method for VLC system based on liquid crystal RIS assistance [J]. Optical Communication Technology, 2024, 48(5): 41-45.  
 [8] ABDELHADY A M, AMIN O, SALEM A K S, et al. Channel characterization of IRS-based visible light communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(3): 1913-1926.  
 [9] 徐珊. 非视距水下无线光通信信道建模及性能分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2024.  
 XU S. Modeling and performance analysis of non line of sight underwater wireless optical communication channel[D]. Xi'an: Xidian University, 2024.  
 [10] SUN S Y, YANG F, SONG J, et al. Joint resource management for intelligent reflecting surface-aided visible light communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6508-6522.  
 [11] SUN S Y, YANG F, SONG J, et al. Optimization on multiuser physical layer security of intelligent reflecting surface-aided VLC[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(7): 1344-1348.  
 [12] YANG L, GUO W, DA COSTA D B, et al. Free-space optical communication with reconfigurable intelligent surfaces[J]. arXiv preprint, 2012, arXiv:2012.00547.  
 [13] NDIJONGUE A R, NGATCHED T M N, DOBRE O A, et al. Analysis of RIS-based terrestrial-FSO link over G-G turbulence with distance and jitter ratios[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(21): 6746-6758.  
 [14] WANG H B, ZHANG Z C, ZHU B C, et al. Performance analysis of multi-branch reconfigurable intelligent surfaces-assisted optical wireless communication system in environment with ob-

- stacles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10): 9986-10001.
- [15] VISHWAKARMA N, R S. Performance analysis of multiple optical reflecting surfaces assisted FSO communication[C]// Proceedings of the 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [16] DEKA R, ALAM M S, AHMED I, et al. Performance analysis of a RIS-HAPS assisted FSO-UWOC system for ground-air-underwater connectivity[C]// Proceedings of the 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [17] NAIK R P, SALMAN M, BOLBOLI J, et al. Multiuser data transmission aided by simultaneous transmit and reflect reconfigurable intelligent surface in underwater wireless optical communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8420-8433.
- [18] SHEEBA A, DHARSHINI W M, SUVETHA P, et al. Performance analysis of triple hop RF-RIS convergent with FSO and UWOC system[C]// Proceedings of the 2025 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.
- [19] LI S, YANG L, DA COSTA D B, et al. On the performance of RIS-assisted dual-hop mixed RF-UWOC systems[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(2): 340-353.
- [20] NAIK R P, CHUNG W Y. Evaluation of reconfigurable intelligent surface-assisted underwater wireless optical communication system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(13): 4257-4267.
- [21] ATA Y, ABUMARSHOUD H, BARIAH L, et al. Intelligent reflecting surfaces for underwater visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(1): 7300609.
- [22] BERNOTAS M, NELSON C. Probability density function analysis for optimization of underwater optical communications systems[C]// Proceedings of the OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-8.
- [23] JAMALI M V, KHORRAMSHAHI P, TASHAKORI A, et al. Statistical distribution of intensity fluctuations for underwater wireless optical channels in the presence of air bubbles[C]// Proceedings of the 2016 Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [24] 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.
- [25] VALI Z, GHOLAMI A, GHASSEMLOOY Z, et al. Experimental study of the turbulence effect on underwater optical wireless communications[J]. Applied Optics, 2018, 57(28): 8314-8319.
- [26] 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.
- [27] BHOWAL A, KSHETRIMAYUM R S. Transmit laser selection for two hop decode and forward FSO communication with pointing errors[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2301-2305.
- [28] ELAMASSIE M, AL-NAHHAL M, KIZILIRMAK R C, et al. Transmit laser selection for underwater visible light communication systems[C]// Proceedings of the 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [29] BHOWAL A, KSHETRIMAYUM R S. Transmit laser selection for dual hop decode and forward UWOC cooperative communication[C]// Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [30] 张琦, 岳殿武, 赵公诺, 等. 广义发射激光选择下的 FSO-VUWOC 混合系统中断概率分析[J]. 中国激光, 2024, 51(23): 82-94.
- ZHANG Q, YUE D W, ZHAO G N, et al. Outage-probability analysis of mixed FSO-VUWOC systems with generalized transmit-laser selection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(23): 82-94.
- [31] IJEH I C, ALI KHALIGHI M, ELAMASSIE M, et al. Outage probability analysis of a vertical underwater wireless optical link subject to oceanic turbulence and pointing errors[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2022, 14(6): 439.
- [32] ELAMASSIE M, SAIT S M, UYSAL M. Effect of sea waves on vertical underwater visible light communication links[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2023, 48(2): 515-525.
- [33] IJEH I C, ALI KHALIGHI M, HRANILOVIC S. Parameter optimization for an underwater optical wireless vertical link subject to link misalignments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46(4): 1424-1437.
- [34] PRIYALAKSHMI B, MAHALAKSHMI K. RETRACTED ARTICLE: performance analysis of video transmission in vertical-UWOC link in mid-sea oil rig IoT systems[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12(5): 5599-5608.



[35] LI C P, PARK K H, ALOUINI M S. On the use of a direct radiative transfer equation solver for path loss calculation in underwater optical wireless channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(5): 561-564.

[36] AI-HABASH A, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1562.

[37] ANDREWS L C, BEASON M K. Laser Beam Propagation in Random Media: New and Advanced Topics[M]. Washington: SPIE, 2023.

[38] CHENG M J, GUO L X, ZHANG Y X. Scintillation and aperture averaging for Gaussian beams through non-Kolmogorov maritime atmospheric turbulence channels[J]. Optics Express, 2015, 23(25): 32606-32621.

[39] 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.

[40] ELAMASSIE M, UYSAL M. Asymptotic performance of generalized transmit laser selection over lognormal turbulence channels[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(8): 1762-1766.

[41] RAHMAN Z, TAILOR N V, ZAFARUDDIN S M, et al. Unified performance assessment of optical wireless communication over multi-layer underwater channels[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(5): 7349114.

[42] PHAM T V, THANG T C, PHAM A T. Average achievable rate of spatial diversity MIMO-FSO over correlated Gamma - Gamma fading channels[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(8): 662-674.

[43] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. 10th Edition, Washington: Dover Publications, 1972.

[44] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[M]. 8th Edition. Waltham MA: Elsevier, 2014.

[45] TANG S J, ZHANG X D, DONG Y H. Temporal statistics of irradiance in moving turbulent ocean[C]//Proceedings of the 2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-4.

[46] ELAMASSIE M, UYSAL M. Outage performance analysis of vertical underwater VLC links[C]//Proceedings of the 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.

[47] ELAMASSIE M, UYSAL M, BAYKAL Y, et al. Effect of eddy diffusivity ratio on underwater optical scintillation index[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(11): 1969-1973.

[作者简介]



赵公诺（2001-），男，大连海事大学信息科学技术学院硕士生，主要研究方向为无线光通信。



岳殿武（1965-），男，博士，福耀科技大学计算与人工智能学院教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信技术（包括无线光通信）。



杨佳宁（2001-），女，大连海事大学信息科学技术学院硕士生，主要研究方向为无线通信。



张琦（1994-），男，大连海事大学信息科学技术学院博士生，主要研究方向为无线光通信。