

基于涡旋光空分复用水下无线光通信系统 的激光雷达三维点云数据传输

王振^{1)2)†} 李朝锋²⁾ 王琛²⁾ 曾炯超¹⁾ 钟伟¹⁾ 潘翔²⁾ 王子南¹⁾

1) (电子科技大学信息与通信工程学院, 成都 611731)

2) (中国电子科技集团公司第三十四研究所, 空天激光部, 桂林 541004)

水下无线光通信具有低延迟和高通信速率等优势。然而, 水中的散射和湍流会导致比特误码率上升以及传输速率下降。本文研究了在水下无线光通信系统中, 涡旋光束作为信号载体在湍流和散射环境下的通信性能。光源为 450 nm 半导体激光器, 单通道调制速率为 50 Mb/s, 采用不归零开关键控调制方案, 传输载荷为水下激光雷达系统获取的水下目标三维点云数据。本文将涡旋光束与高斯光束的数据传输性能进行了对比。涡旋光束在本文设置的颗粒散射和热致湍流条件下的误码率均低于高斯光。在此基础上, 本文构建了总传输速率为 100 Mbit/s 的双通道同轴同心环空分复用系统, 接收端依据内外环径向位置完成通道分离。在衰减系数为 18.94m^{-1} 时, 无、弱和强热致扰动条件下测得的比特误码率分别为 8.7×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 和 1.5×10^{-3} 。

关键词: 水下无线光通信, 涡旋光束, 点云, 空分复用

PACS: 42.60.-v, 42.65.Tg, 42.79.Sz, 42.81.Dp

†通信作者. wangzhen3@cetc.com.cn

第一作者. wangzhen3@cetc.com.cn

1 引言

随着水下通信需求的迅速增长, 水下无线光通信 (Underwater Optical Wireless Communication, UWOC) 因其高带宽和低延迟的内在优势, 已成为海洋观测、深海作业以及水下设备协同等场景中的关键技术^[1,2]。相比于水下声学通信 (Underwater Acoustic Communication, UAC) 和射频 (Radio Frequency, RF) 通信, UWOC 在短至中距离链路中能够提供高出一个数量级的传输速率以及更低的端到端时延^[3]。然而, 其性能受到水体吸收与散射共同作用的限制, 同时也受到湍流引起的折射率波动的影响, 这些通常表现为接收功率下降、波前畸变以及比特误码率 (Bit Error Rate, BER) 上升, 从而对通信链路的可靠性和可扩展性构成挑战^[4]。

现有的 UWOC 系统多采用高斯光束 (Gaussian Beam, GB) 作为信号载体^[5-7]。在清澈水体中, GB 具有良好的链路预算。然而在浑浊水环境中, 由颗粒散射引起的多径效应和时延扩展会显著增强, 温度和流动扰动导致的光束漂移与波前退化, 这些因素共同限制了传输距离和链路稳定性^[8]。

相比之下, 携带轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 的涡旋光束具有环状光强分布和螺旋相位结构, 在散射主导的环境中表现出与基模高斯光不同的传输特性, 已有实验表明涡旋光在浑浊水体中可以获得优于 GB 的通信性能^[9]。此外, 不同 OAM 模式在理想条件下具有正交性, 可作为独立空间信道提高通信容量^[10-18]。Ren 等通过复用四束 OAM 光, 在 1.2 m 水下信道中分别实现了 4 Gbit/s 和 40 Gbit/s 的总传输速率, 接收端采用空间光调制器进行解复用, 并考察了颗粒浑浊度、水流和热梯度等扰动, 其中热梯度引起的光束畸变最为明显^[12]。Zhang 等研制了完整封装的双通道 OAM 水下通信原型系统, 利用 Q-plate 完成双模式的复用和解复用, 在 6 m 水下环境中实现了每通道 625 Mbit/s 的通信速率^[13]。

除传统相位解复用外, 近年来人工智能也被用于补偿海洋湍流引起的涡旋光畸变。Zhan 等提出了基于衍射深度神经网络的自适应光学方法, 根据实验采集的畸变光强分布预测海洋湍流相位屏, 并利用预测相位对涡旋光进行补偿, 从而提高湍流条件下的模式纯度^[19]。Fan 等将 Gerchberg-Saxton 相位恢复算法与卷积神经网络结合, 采用 16 种 LG 模式传输 256 级灰度图像; 当海洋湍流强度达到 $C_n^2 = 10^{-11} \text{K}^2 \text{m}^{-2/3}$ 时, 该方法仍可工作, 并将模式识别准确率由 0.75 提高至 0.93, 将 BER 降低至 6.53×10^{-3} ^[20]。

然而, 现有的 OAM-UWOC 研究实验场景多局限于单通道模型, 对于散射与湍流共同作用条件下误差机理及其定量影响的系统性评估仍然不足。此外, 实

验信号往往使用伪随机二进制序列（Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS），其统计特性与实际应用负载存在差异^[21]。例如，水下激光雷达（Light Detection And Ranging, LiDAR）生成的三维点云数据具有结构化特点，对链路抖动和色散更加敏感。然而，目前尚缺乏对三维点云数据在不同水环境下端到端传输可靠性的系统验证。

上述研究在传输距离、空间通道数、数据速率、相位敏感解复用及智能补偿等方面均取得了重要进展。与追求传输距离、通道数量或数据速率纪录的研究不同，本文重点考察复杂水下信道中涡旋光通信系统的实际适用性与性能边界。在波长为 450 nm、传输距离为 0.7 m 的统一实验平台上，通过设置多个颗粒散射衰减系数和多种热致湍流强度，系统比较了高斯光束（GB）与涡旋光束在不同散射—湍流组合条件下的误码率（BER）性能。

在此基础上，本文构建了单通道速率为 50 Mbit/s、总传输速率为 100 Mbit/s 的双通道涡旋光通信系统，并设计了一种中心开有斜孔的反射镜，根据两路光束的内、外环半径差异实现空间解复用。该接收方案无须恢复 OAM 光束的螺旋相位，也不依赖神经网络训练，具有结构简单、实现成本低和计算复杂度低等特点。研究重点包括散射与湍流共同作用下的通信性能、通道串扰以及 LiDAR 三维点云重建误差，旨在评估低复杂度涡旋光水下通信系统的适用范围及失效边界。

实验结果表明，在 0.7 m 传输距离、颗粒散射衰减系数为 18.94 m^{-1} 且存在强热致湍流的条件下，所构建系统仍可实现 1.5×10^{-3} 的误码率。上述结果可为复杂水环境下 OAM 水下无线光通信（OAM-UWOC）系统的设计与性能评估提供参考，并为该系统进一步拓展至大规模、多模式复用及远距离传输场景提供实验依据和基础数据。

2 涡旋光水下传输理论模型

光在水中受到吸收、散射、湍流等效应的影响，会产生衰减。设 a 和 b 分别表示吸收系数和散射系数，它们均为波长 λ 的函数，分别记为 $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 。它们的和即为衰减系数 $c(\lambda)$ ，即 $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ 。

本文采用米氏散射理论^[22]构建与实验相匹配的微观模型。表征介质消光和散射特性的关键在于单位体积介质的消光截面和散射截面，它们决定了衰减系数 $c(\lambda)$ 和散射系数 $b(\lambda)$ 。假设颗粒均匀分布，对于特定的波长，已知单位体积的颗粒数密度 ρ 以及平均颗粒半径 r ，则相应的系数可表示为：

$$\begin{cases} c = \rho Q_e \pi r^2 \\ b = \rho Q_s \pi r^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中 Q_{ext} 和 Q_{sca} 分别表示消光效率因子和散射效率因子，它们反映了入射场与颗粒之间的有效相互作用强度。当入射场不是平面波，而是具有特定横向模式的结构光（如高斯束 GB 和拉盖尔-高斯束 LGB）时，效率因子及其对应的截面会表现出束形依赖性。在广义洛伦兹-米氏理论（Generalized Lorenz-Mie Theory, GLMT）框架下^[22]，可以通过束因子得到散射截面和消光截面的表达式^[23]：

$$C_{sca} = \frac{\lambda}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^{+n} \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n+|m|)!}{(n-|m|)!} \times (|a_n|^2 |g_{n,TM}^m|^2 + |b_n|^2 |g_{n,TE}^m|^2) \quad (2)$$

$$C_{ext} = \frac{\lambda^2}{\pi} \text{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^{+n} \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n+|m|)!}{(n-|m|)!} (a_n |g_{n,TM}^m|^2 + b_n |g_{n,TE}^m|^2) \right] \quad (3)$$

其中 Re 表示取实部， a_n 和 b_n 为米氏散射系数。通过散射截面与散射系数之间的关系，可以计算散射效率因子和消光效率因子。因效率因子依赖于入射光束的形状，所以在相同的颗粒统计参数（ ρ 、 r 、介质折射率等）下，LGB 与 GB 的散射和吸收将有所不同，即 $b_{LGB} \neq b_{GB}$ 、 $c_{LGB} \neq c_{GB}$ 。 g_{TE} 和 g_{TM} 分别表示横向电场（TE）模式和横向磁场（TM）模式的束因子，其表达式如下：

$$\begin{bmatrix} g_{n,\text{TM}}^m \\ g_{n,\text{TE}}^m \end{bmatrix} = \frac{Z_n^m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \begin{bmatrix} E_r^{\text{Loc}}(r, \theta, \varphi) / E_0 \\ H_r^{\text{Loc}}(r, \theta, \varphi) / H_0 \end{bmatrix} \exp(-im\varphi) d\varphi \quad (4)$$

其中, n 是光束在球坐标展开中的模阶数; m 是角向模指数, 与球坐标中的方位角 φ 相关, 用于描述模在方位方向的分布特性。取值范围为 $n=1, \dots, \infty$; $m=-n, \dots, +n$ 。 E_r 和 H_r 分别表示电场和磁场的径向分量。 E_0 和 H_0 分别为电场和磁场的振幅。

当光子通过受湍流影响的 UWOC 信道时, 由湍流引起的吸收和散射效应所导致的衰减系数 α 包含两个组成部分: 介质中的介电损耗 α_ε , 以及由介质物理性质随机性所引起的随机扰动 α_γ :

$$\alpha = \alpha_\varepsilon + \alpha_\gamma \quad (5)$$

$$\alpha_\varepsilon = k \cdot \varepsilon_i \varepsilon_\gamma^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

此处 k 是波数, $\varepsilon = \varepsilon_\gamma + i\varepsilon_i$ 是海水的介电常数。对于标量波, 衰减系数 α_γ 可以由海洋折射率的功率谱来计算^[23]:

$$\alpha_\gamma = 4\pi^2 k^2 \int_0^{2k} \Phi_n(\kappa) \kappa d\kappa \quad (7)$$

其中, 海洋折射率功率谱由下式给出^[24]:

$$\begin{aligned} \Phi_n(\kappa) = & \frac{1}{4\pi} A^2 \beta \chi_T \varepsilon_K^{-1/3} \kappa^{-11/3} \\ & \times \left[g(\kappa\eta, Pr_T) + \frac{d_r}{\omega^2} g(\kappa\eta, Pr_S) - \frac{(1+d_r)}{\omega} g(\kappa\eta, Pr_{TS}) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

此处 κ 代表湍流起伏的空间频率; η 是水下湍流的 Kolmogorov 长度; χ_T 是温度方差耗散率, ε_K 是湍流动能耗散率, ω 是海洋湍流中盐度和温度波动的平衡参数, Pr_T 和 Pr_S 分别表示温度普朗特数和盐度施密特数, $Pr_{TS} = 2Pr_T Pr_S (Pr_T + Pr_S)^{-1}$ 。 β 是无量纲常数, A 是热膨胀系数, d_r 是海洋湍流混合过程中旋涡运动引起的盐度与温度扩散能力之比, g 是无量纲函数。上述

理论分别描述了悬浮颗粒散射和折射率随机起伏对光束传播的影响，但仅由散射截面和湍流功率谱尚不能直接得到通信系统的 BER。为了建立微观传播过程、接收光子统计和宏观误码性能之间的定量联系，本文参考 EMC 和 FSEMC 方法，将发射光场划分为携带幅度和相位信息的光子包，根据 Mie 散射振幅矩阵更新光子包的传播方向、复电场和相位，并在接收孔径内累积到达光子包的能量。不同光子包的传播光程用于构建信道冲激响应，从而同时得到有限孔径接收能量和散射引起的时域拖尾^[9,25,26]。综合考虑输运衰减、模式相关接收能量、散射拖尾、湍流随机衰落、背景散射光子和光子散粒噪声，最终通过光子计数门限判决得到仿真 BER。

在 50 Mbit/s 不归零开关键控(Non-Return-to-Zero On-Off Keying, NRZ-OOK)条件下，单比特持续时间为 20 ns。在给定平均光电子数条件下，接收光电子数服从泊松分布：

$$N_{j,k} \sim \text{Poisson}(\mu_{j,k}) \quad (9)$$

接收端采用与实验数据处理一致的固定门限进行判决：

$$\hat{x}_{j,k} = \begin{cases} 1, & N_{j,k} \geq K, \\ 0, & N_{j,k} < K. \end{cases} \quad (10)$$

蒙特卡洛 BER 由恢复序列与原始序列逐位比较得到。

仿真参数与实验条件保持一致：波长为 450 nm，水下传输距离为 0.7 m，衰减系数分别为 8.66、9.69、10.57 和 11.15 m⁻¹，涡旋光拓扑荷为 8。颗粒平均半径设为 3 μm，水和颗粒折射率分别为 1.33 和 1.57。

本文误码率 (BER) 定义为接收端数字信号处理后，误码比特数占总传输比特数的比值，计算公式为：

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}} \quad (11)$$

其中 N_{error} 为错误比特数， N_{total} 为传输总比特数。

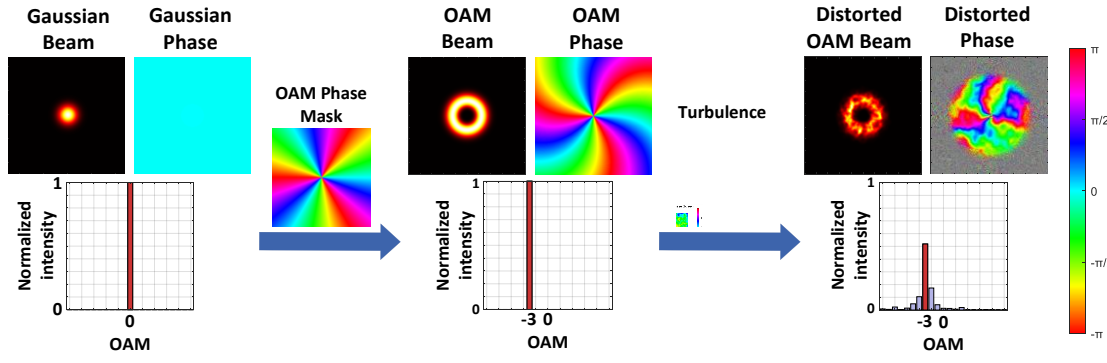
三维点云重建质量则通过重建误差评估，定义为接收端重建点云坐标与原始目标点云坐标的欧氏距离偏差，即：

$$e_i = \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2 + (z'_i - z_i)^2} \quad (12)$$

其中 (x_i, y_i, z_i) 为原始点云坐标， (x'_i, y'_i, z'_i) 为重建点云坐标。误码率用于衡量通信链路的可靠性，重建误差则直观反映三维点云数据的传输保真度。

为定性说明海洋湍流对涡旋光横截面光强和相位分布的影响，图 1 给出了基于海洋湍流折射率功率谱和多相位屏角谱传播方法得到的归一化示意结果。需要说明的是，该计算仅用于展示湍流引起的相位畸变和光强重分布，不作为本文 0.7 m 水下通信实验的定量仿真，也不参与图 4 所示 BER 的计算。该示意计算仅包含随机折射率起伏产生的相位扰动，未引入悬浮颗粒的吸收和散射损耗，因此水体衰减系数不属于该计算的输入参数。对于均匀的 Beer-Lambert 衰减，其作用主要表现为对光场振幅乘以 $\exp(-cL)$ ，不会改变图 1 所展示的归一化光强和相位形态，故未在该示意计算中设置衰减系数。其中参数为：激光波长是 450nm， ϵ_k 是 $10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^3$ ， χ_T 是 $10^{-9} \text{K}^2/\text{s}$ ， η 是 10^{-3}m ， Pr_T 是 7， Pr_s 是 700，传输距离是 25m，相位屏间隔是 5m，拓扑荷数是 -3。选择上述距离和拓扑荷是为了使湍流引起的光场畸变在归一化图中清晰可见，不代表本文实验所采用的 0.7 m 传播距离和载波参数。

图 1 表明，随机折射率起伏会破坏涡旋光原有的环形光强分布和螺旋相位结构，使光强发生局部起伏并产生相位畸变。在采用相位投影或 OAM 模态识别的接收系统中，这类畸变可能引起接收模式谱展宽及相邻模式耦合。然而，图 1 仅用于说明上述定性变化，不能据此直接得到接收功率、通道串扰或 BER；这些通信指标还取决于水体衰减、接收孔径、探测器噪声及具体解调方式。



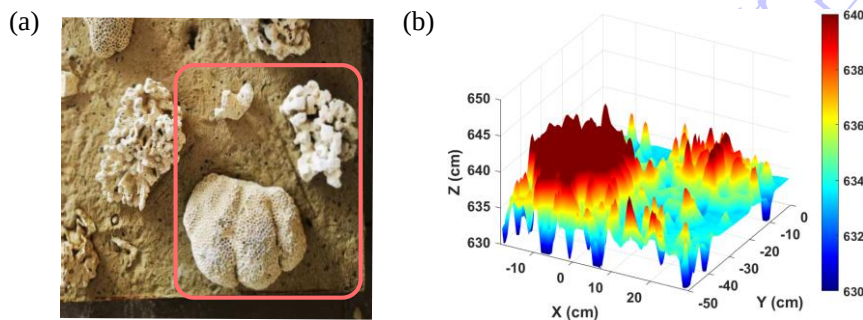
(网刊彩色)图 1. 海洋湍流作用下涡旋光归一化光强和相位畸变的示意仿真结果。

Fig. 1. Illustrative normalized intensity and phase distributions of a vortex beam distorted by oceanic turbulence.

3 三维点云数据传输实验

我们使用螺旋相位板（SPP）生成涡旋光束（Vortex beams）。一个基模高斯光束（GB）入射到拓扑荷数为 l 的 SPP 上，从而产生 l 阶 LGB。

水下激光雷达获取的点云数据被用作水下光通信的传输数据。激光雷达被测目标是浸入水中的珊瑚样品，如图 2(a) 所示。珊瑚样品被放置在距离发射窗口 6 米的水箱中。水的衰减系数 c 为 1.07 m^{-1} 。图 2(b) 显示了激光雷达扫描点云数据在水下通道传输前重建的表面。



(网刊彩色)图 2. 水下被测目标及传输前三维点云成像形式

(a) 红色框内是被测目标；(b) 传输前根据三维点云坐标数据的表面重建。

Fig. 2. Underwater target and 3D point cloud Imaging before transmission. (a) The detected target is marked within the red circle;

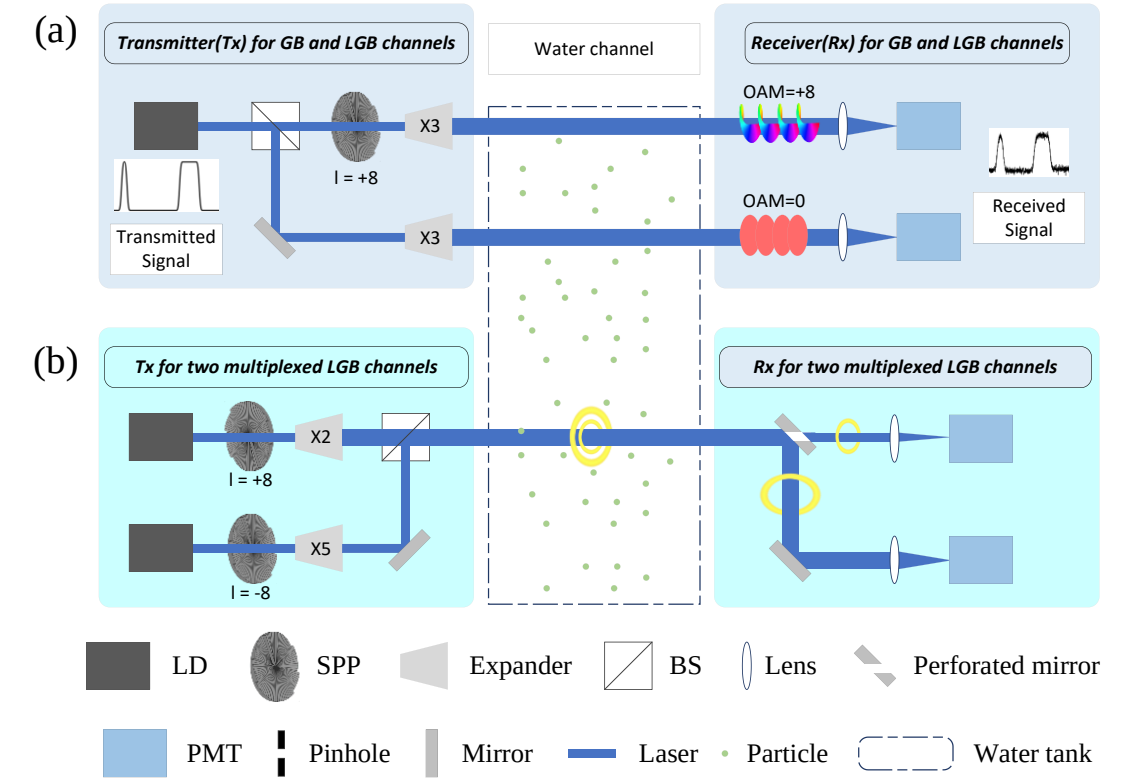
(b) Surface reconstruction of the 3D point cloud coordinate data.

在发送端，点云中各点的空间坐标按照预设数据格式转换为二进制序列，并加载到任意波形发生器（AWG, SDG6052X-E）中，生成 50 Mb/s 的 NRZ-OOK

电信号。经过可变衰减器放大和调节后，该电信号在 Bias-T 电路中与直流偏置叠加，用于驱动 450 nm 半导体激光器。编码后的光束通过螺旋相位板（SPP）生成涡旋光束（LGB, $l=\pm 8$ ），然后进行准直和水中传输。需要说明的是，为保证 GB 与 LGB 通信性能比较的公平性，实验采用可调衰减片分别调节两路光束功率，并利用光功率计在水槽入射窗口前进行测量，使 GB 和涡旋光的入水功率调节至相同读数，约为 10 mW。

通信通道是一个 $0.7\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的水箱，实验中，颗粒散射和热致湍流分别进行控制。首先向水槽中加入氢氧化镁悬浮颗粒，以改变水体的散射衰减特性。由于颗粒实际浓度会受到水槽体积、颗粒分散状态、沉降及团聚等因素影响，本文不以氢氧化镁的加入量表征水体散射强度，而是在每种水体条件下直接测量衰减系数，并以实测衰减系数作为散射条件的定量指标。在确定水体衰减系数后，通过向水槽中引入热水产生温度梯度和折射率随机起伏，以构造热致湍流条件。实验中水体温度为 25 °C 时定义为无热致湍流条件；水体温度升高至 27 °C 和 29 °C 时，分别定义为弱热致湍流和强热致湍流条件。为防止探测器饱和，在接收端插入了 20 dB 中性密度滤光片（NDF），透镜收集并聚焦光信号到光电倍增管（PMT, R9880U-300），具体响应参数参见生产商数据手册，信号由示波器（SDS5102X）采样，用于数字信号处理（DSP）和误码率（BER）计算。

我们构建了如图 3 所示的实验平台，对比了涡旋光和高斯光在不同湍流强度下点云数据的传输误码率，并进行了两路涡旋光空分复用（Space Division Multiplexing, SDM）的实验验证。



(网刊彩色)图 3. 水下无线光通信实验系统:(a) GB 与 LGB 水下通信对比;(b)LGB 空分复用水下无线光通信系统。

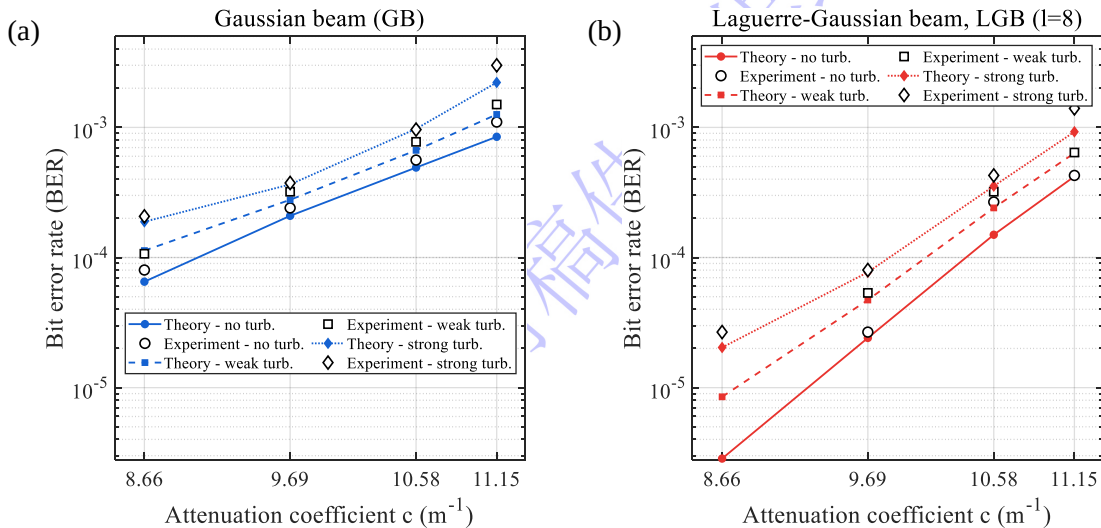
Fig. 3. UWOC experimental system: (a) Comparison of underwater communication between GB and LGB; (b) SDM-UWOC system based on LGB.

我们首先进行了如图 3(a) 所示的 GB 与 LGB 水下无线通信对比实验。

GB 通过一个非偏振分束器被分成两束光：其中一束光通过 SPP (+8) 生成 LGB (OAM 模式 $l=+8$)，另一束光保持为 GB。随后，对两束光进行扩束准直，并平行地入射到水槽中。在接收端探测器分别收集来自两个信道的光信号。需要说明的是，本文选择 $l=\pm 8$ 作为双通道 LGB 载波，主要基于实验系统的光束尺寸、接收孔径和带孔反射镜径向分离条件，而不是认为该拓扑荷数对所有水下信道均为最优阶数。因此，随着拓扑荷数增大，光束环半径和发散程度均会增加。较低阶涡旋光的环半径较小，在当前带孔反射镜接收结构中，经过不同倍率扩束后形成的内外环径向间隔可能减小，从而增加空间重叠；较高阶涡旋光虽然具有更大的环半径，但更容易受到有限光学口径截断、传播发散和接收能量下降的影响。本文所采用的拓扑荷数能够在现有发射口径、0.7 m 传播距离和接收光学结构下形成可分离的环形光斑，因而被选作本次的载波阶数。

图 4 给出了不同散射与湍流强度条件下两种通信光源实验与仿真误码率 (BER) 的对比结果。其中, 图 4(a) 为 GB 的实验与仿真结果, 图 4(b) 为 LGB 的实验与仿真结果。结果表明, 随着水体衰减系数的增大, GB 和 LGB 的 BER 均呈上升趋势, 但在相同条件下, LGB 的 BER 始终低于 GB。在 GB 与 LGB 对比实验中, 两种光束经过相应的相位调制、扩束和准直光路后, 均利用可调衰减片将水槽入射窗口前的光功率调节至约 10 mW。根据 Beer-Lambert 定律, 对于传播长度 0.7 m, 初始功率 10 mW 以及实验所设置的衰减系数范围, 计算得到的信道输出功率约为 23.3~4.08 μ W; 该数值尚未包含水箱表面反射、接收透镜、孔径截断及反射镜损耗, 因此不等同于 PMT 光阴极处的实际入射功率。实验所用功率计的最低可靠测量功率约为 1 μ W, 高衰减条件下完整接收光路后的功率低于其测量下限, 而 PMT 仍可输出可辨识的通信波形。因此, 本文未以 Beer-Lambert 估算值替代实际 PMT 入射功率, 也未绘制 BER 随实测接收光功率变化的曲线, 以避免将名义信道输出功率误认为经过完整接收链路标定后的实际接收功率。

对于 GB 和 LGB, 仿真结果均较好地再现了 BER 随水体衰减系数和湍流强度增加而上升的总体变化规律。在相同散射和湍流条件下, LGB 的仿真 BER 整体低于 GB, 且与实验结果具有较好的一致性。上述结果表明, 在本文所设置的散射与湍流共同作用的水下信道中, LGB 具有优于 GB 的通信性能。

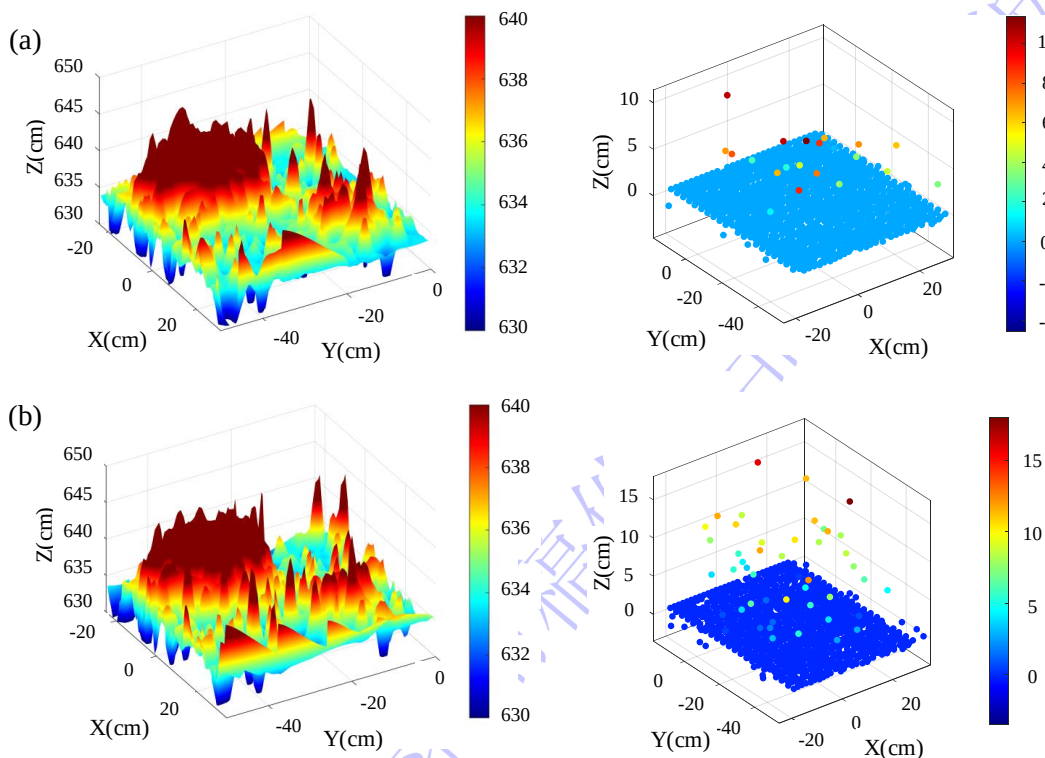


(网刊彩色)图4. 高斯光和涡旋光在不同衰减系数及湍流条件下蒙特卡洛 BER 与实验 BER 的对比。(a) GB; (b) LGB。曲线表示蒙特卡洛结果, 离散点表示实验结果。

Fig. 4 Comparison of Monte Carlo BER and experimental BER for Gaussian beam (GB) and vortex beam with topological charge $l=8$ under different attenuation coefficients and turbulence conditions. (a) GB; (b) LGB. The solid curves denote Monte Carlo simulation results, and discrete scatter points represent experimental measurements.

图 5 展示了在弱湍流但强散射环境中 $c=11.15\text{m}^{-1}$, LGB 和 GB 的三维点云重建结果及其重建误差, 其中 (a)对应 LGB, (b)对应 GB。重建误差定义为接收点云坐标与原始点云坐标之间的差值; 若某一点云坐标成功传输, 则其重建误差记为 0。色标表示探测距离 Z (cm), 横轴和纵轴分别表示 X/Y (cm)。

从图中可以看出, 在上述条件下, GB 点云结构出现了明显的畸变和更多的“尖刺”现象, 这是由于 GB 的 BER 高于 LGB 所致。因此, 接收数据相较于原始数据偏差更大, 导致更多目标点云坐标发生偏移或消失。



(网刊彩色)图5. 涡旋光与高斯光水下三维点云数据传输实验结果,左边是传输后

曲面重建图，右边是传输点云数据误差分布，衰减系数 $c = 11.15 \text{ m}^{-1}$ 。(a) 涡旋光；(b) 高斯光。

Fig. 5. Experimental results of underwater 3D point cloud data transmission using LGB and GB: the left side shows the reconstructed surface after transmission, and the right side presents the error distribution of transmitted point cloud data, with attenuation coefficient $c=11.15 \text{ m}^{-1}$. (a) LGB; (b) GB.

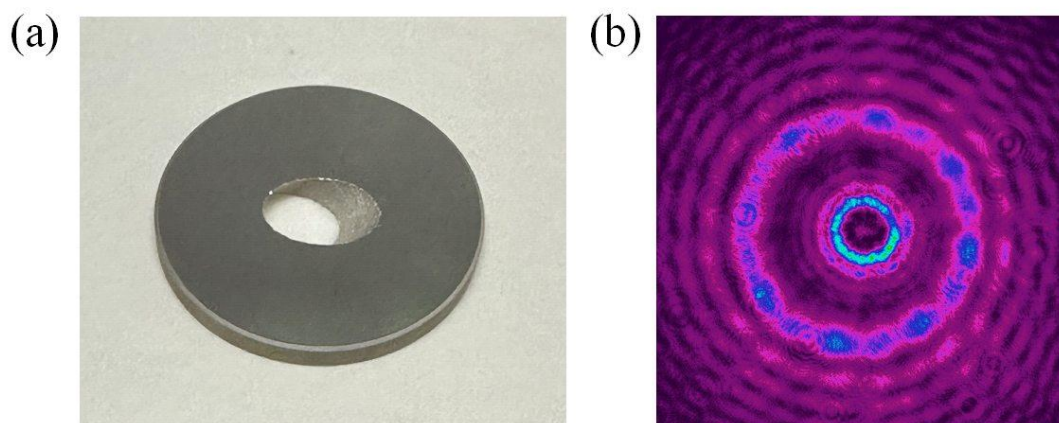
在前述 LGB 与 GB 对比实验的基础上，我们提出了一种基于 LGB 空分复用的通信链路系统结构，如图 3(b) 所示。选择 LGB 作为双通道信号载体，是因为图 4 所示单通道实验表明，在本文所测试的传播距离、接收孔径、颗粒散射和热致湍流条件下，所采用的涡旋光具有低于基模高斯光的 BER。因此，涡旋光在本系统中主要承担通信载波的作用，而接收端用于区分两个信道的物理自由度是环形光强分布的径向位置。

两台 450 nm 激光器分别承载独立的数据通道 Ch1 和 Ch2，并通过 SPP 产生拓扑荷数为 ± 8 的两束 LGB。两个相反拓扑荷在本文中用于定义和标识两路独立的涡旋光载波状态，而不是接收端直接检测的信道判别变量。选择相同的绝对拓扑荷数，可以使两束光在扩束前具有相近的模式阶数、理想径向光强结构和发散特征，从而避免因采用不同拓扑荷数而引入额外的模式阶数差异。

Ch1 和 Ch2 分别采用 2 倍和 5 倍扩束倍率，以独立调节两束涡旋光的横向尺度，并在接收平面形成半径不同的内、外同心环。两束光经分束器同轴合束后共同进入水槽。在接收端，带孔反射镜使位于中心孔径范围内的内环光束透射，并将外环光束反射至另一方向；两路光信号随后分别经透镜汇聚至不同的光电倍增管。

需要指出的是，若采用两束半径明显不同的其他环形光束，原则上也可以通过该带孔反射镜实现相同的径向空间分离。这说明 OAM 螺旋相位不是当前解复用结构成立的必要条件。但是，解复用自由度与通信载波的选择是两个不同问题：图 4 的实验结果表明，本文采用的 LGB 相对于 GB 在所测试的散射和湍流条件

下具有更低的 BER，因此后续双通道系统继续采用涡旋光作为信号载体。



(网刊彩色)图 6. 解复用带孔反射镜及空间分离的不同模式光强分布 (a) 解复用带孔反射镜; (b) 空间分离的不同模式光强分布

Fig. 6. Intensity pattern of two LGBs after spatially separated and Perforated mirror.

(a) Perforated mirror ;(b) Intensity pattern of two LGBs after spatially separated

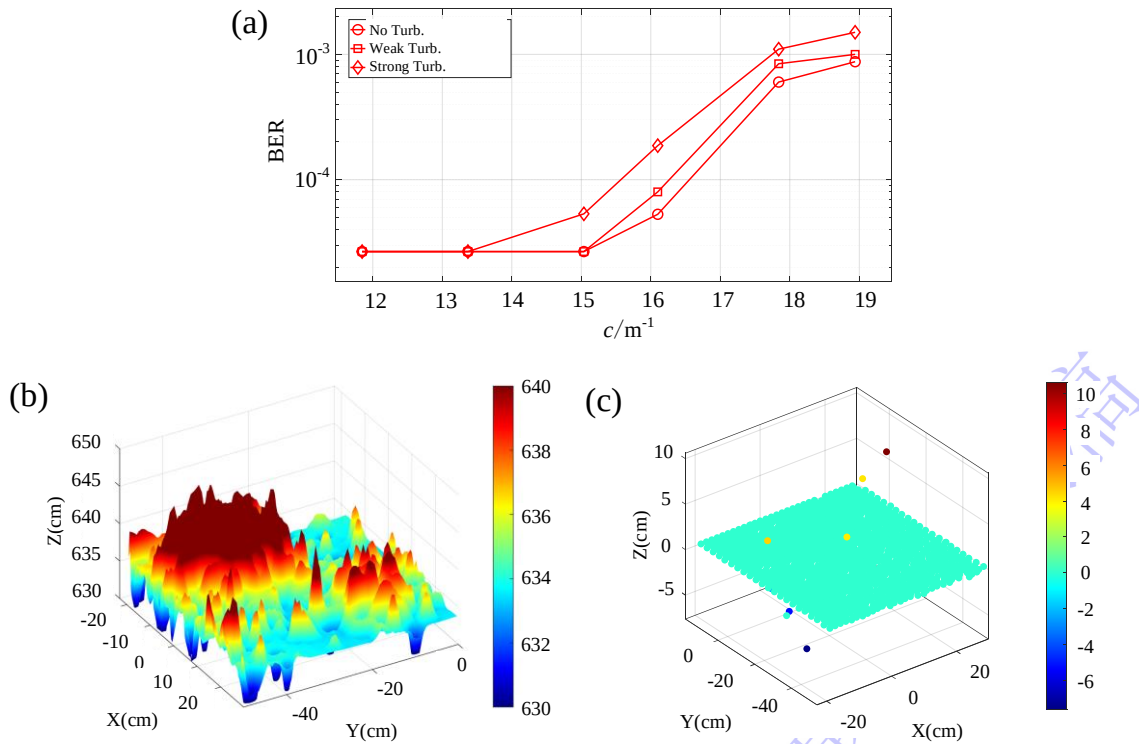
空分复用实验结果如图 7 所示，两通道实现了 100Mbit/s 的通信速率。首先进行了不同湍流强度的误码率测量，误码率 (BER) 结果如图 7(a) 所示：随着衰减系数 c 的增加，BER 单调上升。在无湍流的情况下，当 $c < 15\text{m}^{-1}$ 时，BER 保持相对稳定且较低。然而，随着湍流强度的增加，BER 明显上升。具体而言，当 $c = 18.94\text{m}^{-1}$ 时，无湍流情况下的 BER 为 8.7×10^{-4} ；弱湍流下，BER 为 1.0×10^{-3} ；强湍流下，BER 为 1.5×10^{-3} 。

图 7(b) 展示了在强湍流条件下且 $c = 16\text{m}^{-1}$ 时的三维点云重建结果，图 7(c) 展示了对应的重建误差。由于每个点的空间坐标由多个二进制位共同表示，任一比特发生错误均可能造成对应坐标值偏移；其中，高位比特错误通常会造成较大的坐标偏差，而低位比特错误引起的偏差相对较小。因此，点云中的异常点和局部坐标偏移不仅与总体 BER 有关，也受到误码所在比特位置及误码连续性的影响。

本文以 BER 作为通信链路性能的主要评价指标，点云重建结果主要用于说明该 BER 水平下系统能否完成实际三维数据的传输与恢复，而不将点云结果作

为独立的水下 LiDAR 探测精度或测深性能评价。

本文仅对 $l=\pm 8$ 的双通道系统进行了实验验证，研究目的在于评价固定涡旋光阶数下，同心环径向空间复用结构在散射和热致湍流条件中的可行性，而不是确定水下通信中的最优拓扑荷。对于其他拓扑荷数，其峰值环半径、环宽、传播发散、有限孔径收集效率和湍流敏感性均可能发生变化，并进一步影响内外环空间重叠、通道串扰和 BER。因此，本文关于双通道复用性能的结论仅适用于所测试的拓扑荷数、扩束倍率、接收孔径及传播距离，不能直接推广至其他拓扑荷。



(网刊彩色)图 7.空分复用实验结果: (a) 不同湍流强度和散射系数下误码率曲线; (b) 传输后的三维点云数据重建图 (衰减系数 $c = 16 \text{ m}^{-1}$); (c) 重建误差

Fig. 7. SDM communication experiment results. (a) BER curve; 3D point cloud reconstruction and error result for LGB at $c = 16 \text{ m}^{-1}$; (b) reconstruction; (c) reconstruction error.

为定量评价带孔反射镜对内、外环空间信道的分离能力，本文进一步测量了双通道系统在不同衰减系数和热致湍流条件下的功率串扰。测量过程中每次仅开启一个发射通道，另一通道保持关闭，并在两个接收端分别测量目标通道功率和交叉泄漏功率。两个通道的入水功率保持一致，接收光路和探测器参数在测量过

程中保持不变。

表 1 给出了双通道系统在不同衰减系数和热致湍流条件下的串扰结果。总体而言，在相同湍流条件下，随着水体衰减系数增加两通道串扰逐渐增大，即串扰数值逐渐接近 0 dB，表明水体散射增强后内、外环之间的空间耦合更加明显。在相同衰减系数下，热致湍流增强通常也会使串扰升高，这主要是由于光束漂移、环形光斑展宽及局部光强畸变增加了两个接收区域之间的能量重叠。

表 1. 全部测试条件下的串扰结果，每个单元格依次表示 $Ch_{1 \rightarrow 2}/Ch_{2 \rightarrow 1}$
Table1. Crosstalk results under all tested conditions and each cell presents the crosstalk values in the order of $Ch_{1 \rightarrow 2}/Ch_{2 \rightarrow 1}$.

衰减系数(m^{-1})	无湍流(dB)	弱湍流(dB)	强湍流(dB)
5.05	-9.58/-12.72	-8.11/-11.63	-3.57/-8.24
6.05	-9.01/-12.29	-6.62/-10.51	-7.14/-10.90
6.90	-8.59/-11.98	-7.67/-11.30	-7.78/-11.38
9.92	-7.24/-10.97	-7.10/-10.87	-6.31/-10.29
11.67	-6.23/-10.22	-5.50/-9.68	-5.90/-9.98
12.35	-5.71/-9.84	-5.01/-9.31	-5.60/-9.76
14.92	-4.29/-8.78	-3.57/-8.24	-2.29/-7.29

两个串扰方向存在明显的不对称性。在各测试条件下，内环通道 Ch_1 向外环通道 Ch_2 的泄漏更加明显。其原因在于，颗粒散射和热致湍流会使内环光束发生径向展宽和能量外移，部分原本位于内环接收区域的能量扩散至带孔反射镜的外侧反射区域，并进入外环通道的接收端。相比之下，外环能量需要向中心区域重新分布后才能进入内环通道，其泄漏程度相对较低。

4 结 论

本文研究了颗粒散射与热致湍流耦合作用下高斯光束 (GB) 与涡旋光的水下通信性能。结果表明，水体衰减与湍流强度的增强均会恶化两类光束的误码率 (BER)，且涡旋光在全实验工况下均具备更优的抗干扰传输性能。基于蒙特卡罗光子统计模型复现了传输特性演化规律，建立了散射、湍流、有效接收光子数与误码率的定量关系，阐明了水环境干扰的作用机制。

针对单通道传输局限，本文构建了 $1=\pm 8$ 涡旋光同轴同心环空分复用水下通信

系统，可实现双通道稳定传输，在高散射强湍流环境下可有效传输水下 LiDAR 三维点云数据，具备良好的通信性能。串扰测试表明，散射与湍流会加剧通道串扰，且内环向内环的能量外溢串扰更为突出，主要由光束径向展宽效应导致。本研究明确了涡旋光水下通信的抗扰优势与复用传输特性，可为复杂水下光通信场景提供参考，后续可重点开展动态扰动光场补偿、真实水体散射特性等相关研究。

参考文献

- [1] Zayed M, Mokhtar M, Shokair M 2025 *Sci. Rep.***15** 32570
- [2] Oubei H M, Duran J R, Janjua B, Wang H Y, Tsai C T, Chi Y C, Ng T K, Kuo H C, He J H, Alouini M S, Lin G R, Ooi B S 2015 *Opt. Express***23** 23302
- [3] Han X T, Wang W, Li P, Li G Y, Nie W C, Xie Z, Jia S W, Chang C, Liao P X, Xie X P 2025 *Opt. Commun.***579** 131582
- [4] Abd El-Mottaleb S A, Singh M, Atieh A, Aly M H 2024 *Appl. Opt.***63** 5546
- [5] Cai C Y, Du Z H, Liao W D, He Y X, Ma X X, Qin S T, Wang R M, Wang X Y, Zhang T H, Song G B, Chen Q R, Zhang Y F, Gao Y H, Wang H P, Zhang Z J, Xu J 2024 *J. Lightwave Technol.***42** 8541
- [6] Khansalee E, Okamura Y, Hanawa M 2025 *Opt. Commun.***577** 131421
- [7] Angara B R, Shanmugam P, Sandhani C G 2025 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.***345** 109562
- [8] Geldard C T, Butler I M E, Popoola W O 2024 *J. Lightwave Technol.***42** 4444
- [9] Guo S C, He Y, Chen Y Q, Chen W B, Huang Y F, Chen Q 2023 *Opt. Commun.***531** 129214
- [10] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y X, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Nat. Photon.***6** 488
- [11] Willner A E, Huang H, Yan Y, Ren Y X, Ahmed N, Xie G D, Bao C, Li L, Cao Y W, Zhao Z, Wang J, Lavery M P J, Tur M, Ramachandran S, Molisch A F, Ashrafi N, Ashrafi S 2015 *Adv. Opt. Photon.***7** 66

- [12] Ren Y X, Li L, Wang Z, Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, Zhao Z, Xie G D, Cao Y W, Ahmed N, Yan Y, Liu C, Willner A J, Ashrafi S, Tur M, Faraon A, Willner A E 2016 *Sci. Rep.***6** 33306
- [13] Zhang J R, Fan F, Zeng J W, Wang J 2021 *Opt. Express***29** 35570
- [14] Ge X L, Wang B Y, Guo C S 2015 *J. Opt. Soc. Am. A***32** 837
- [15] Baghdady J, Miller K, Morgan K, Byrd M, Osler S, Ragusa R, Li W Z, Cochenour B M, Johnson E G 2016 *Opt. Express***24** 9794
- [16] Abd El-Mottaleb S A, Singh M, Armghan A, Atieh A, Aly M H 2025 *Opt. Commun.***574** 131204
- [17] Zhao Y F, Xu J, Wang A D, Lv W C, Zhu L, Li S H, Wang J 2017 *Opt. Express***25** 28743
- [18] Hei X B, Zhu Q M, Gai L, Chen X, Liu C X, Gu Y J, Li W D 2023 *Opt. Express***31** 19990
- [19] Zhan H C, Peng Y X, Chen B, Wang L, Wang W N, Zhao S M 2022 *Opt. Express***30** 23305
- [20] Fan W Q, Gao F L, Xue F C, Guo J J, Xiao Y, Gu Y J 2024 *Appl. Opt.***63** 982
- [21] Trichili A, Park K H, Zghal M, Ooi B S, Alouini M S 2019 *IEEE Commun. Surv. Tutor.***21** 3175
- [22] Ren K F, Gouesbet G, Gréhan G 1998 *Appl. Opt.***37** 4218
- [23] Ishimaru A 1978 *Wave Propagation and Scattering in Random Media* (New York: Academic Press) p329
- [24] Yao J R, Zhang H J, Wang R N, Cai J D, Zhang Y, Korotkova O 2019 *Opt. Express***27** 27807
- [25] Hou Y Z, Yu L Y, Xu Z, Feng Y M, Zhang Z H, Li C F, Li J, Yang S H 2025 *Acta Phys. Sin.***45** 1906001 (in Chinese) [侯彦佐, 于龙洋, 徐震, 冯义民, 张志恒, 李朝锋, 李静, 杨苏辉 2025 物理学报 **45** 1906001]
- [26] Xu M 2004 *Opt. Express***12** 6530

3D Point Cloud Data Transmission for Underwater LiDAR Based on Vortex Beam Space Division Multiplexing in an Underwater wireless optical communication system

WANG Zhen^{1) 2)†} LI Chaofeng²⁾ WANG Chen²⁾ ZENG Jiongchao¹⁾ ZHONG Wei¹⁾ PAN Xiang²⁾

WANG Zinan¹⁾

1) (School of Information and Communication Engineering, University of Electronic
Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

2) (The 34th Research Institute CETC, Aerospace Laser Department ,Guilin 541004, China)

Abstract

Underwater wireless optical communication (UWOC) offers high bandwidth and low latency for underwater data transmission, but its practical implementation is severely challenged by particle scattering and turbulence, which can cause beam distortion, signal fading, and increased bit error rates (BERs). In this work, we experimentally investigate the transmission performance of Gaussian beams (GBs) and vortex beams carrying orbital angular momentum (OAM) in UWOC systems under combined scattering and turbulence. A 450 nm semiconductor laser with 50 Mbit/s single-channel NRZ-OOK modulation is employed, and comparative experiments are conducted under different water attenuation coefficients and three turbulence conditions. The results show that the BER of both beam types increases with increasing attenuation and turbulence strength, while vortex beams consistently exhibit lower BERs and superior tolerance to the combined interference. A Monte Carlo

photon-statistical model incorporating Mie scattering theory is further developed to reproduce the beam transmission characteristics and quantitatively elucidate the relationships among water scattering, turbulence, received photon number, and system BER.

To increase the transmission capacity while maintaining low system complexity, we further propose and experimentally demonstrate a dual-channel coaxial concentric-ring space-division multiplexing (SDM) system using vortex beams with topological charges of ($l=\pm 8$). By employing different beam expansion ratios, the two vortex beams form spatially separated inner and outer concentric-ring channels at the receiver, enabling passive channel demultiplexing with a perforated mirror without complex phase demodulation or algorithmic compensation. The system achieves a total transmission rate of 100 Mbit/s and successfully transmits underwater LiDAR 3D point-cloud data. Even under severe scattering (18.94 m^{-1}) and strong thermal turbulence, a BER of (1.5×10^{-3}) is maintained. Crosstalk measurements further reveal that scattering and turbulence enhance inter-channel crosstalk and produce an asymmetric crosstalk characteristic, with stronger coupling from the inner-ring channel to the outer-ring channel due to radial beam broadening and outward energy migration.

These results demonstrate the potential of vortex beams for robust UWOC in complex underwater environments and validate the feasibility of low-complexity OAM-based spatial multiplexing for practical

underwater sensing-data transmission. The findings provide experimental and theoretical insights into the performance limits and system design of SDM-UWOC links operating in turbid and turbulent waters.

Keywords: underwater wireless optical communication; optical vortex; point cloud; space division multiplexing

PACS: 42. 60. -v, 42. 65. Tg, 42. 79. Sz, 42. 81. Dp

†Corresponding author. wangzhen3@cetc. com. cn

The first author. wangzhen3@cetc. com. cn

录用稿件，非最终出版稿