

# 光学学报

## 海洋湍流信道中因斯-高斯光束及信号传输特性实验研究

张鹏<sup>1\*</sup>, 戴辉<sup>1</sup>, 何爽<sup>1</sup>, 范云龙<sup>1</sup>, 陈航<sup>1</sup>, 王圆鑫<sup>1,2</sup>, 南航<sup>1</sup>, 佟首峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

**摘要** 因斯-高斯(IG)光束在复杂信道传输中具有较好的抗干扰能力。为此设计并搭建了基于模拟海洋湍流信道的激光通信实验平台,详细研究 IG 光束在海洋湍流信道下光束信号的传输及通信特性。首先实验对比研究了不同海洋湍流强度条件下,IG 光束和高斯光束传输后的光强闪烁指数、质心漂移和探测器接收功率情况;其次通过调制 0.5~3 MHz 频率的方波信号,进一步研究两种光束传输后调制信号波形失真特性;最后进行 IG 光束和高斯光束的 7.5 Mbit/s 通信性能对比实验。实验结果表明:IG 光束的闪烁指数、质心漂移、功率抖动均优于高斯光束,且随着海洋湍流强度增加,IG 光束闪烁指数和质心漂移改善能力增强,功率抖动改善能力降低。在不同模拟海洋湍流中,相同频率的 IG 光束调制方波波形失真度整体低于高斯光束。在误码率为  $3.8 \times 10^{-3}$ (前向纠错阈值)时,IG 光束在不同注水高度信道、不同温度信道和不同盐度信道中的通信性能比高斯光束分别提高了 0.8 dB、4 dB 和 2.5 dB。该实验结果可以为 IG 光束应用于水下激光通信提供参考。

**关键词** 因斯-高斯光束; 海洋湍流; 闪烁指数; 质心漂移; 功率抖动; 波形失真度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231065

### 1 引言

随着海洋空间信息网络发展,节点间海量数据传输对水下通信技术提出了巨大的要求。而水下光通信技术由于其传输速率高、通信容量大、安全性好等优点受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。然而,海洋湍流严重破坏光束波前结构,造成空间光强的波动、光束方向的随机改变、到达角度的起伏以及衍射效应之外附加的光束展宽等<sup>[2]</sup>。光波作为信息载体,对信息传输质量有较大影响,因此具有特殊光强和相位分布的结构光束<sup>[3]</sup>在海洋湍流中的传输研究有十分重要的意义。

因斯-高斯(IG)光束作为具有特殊光强和相位分布的一类结构光束<sup>[3]</sup>,因其抗干扰传输特性成为研究热点之一。2004年, Bandres 和 Gutiérrez-Vega<sup>[4]</sup>首次提出了 IG 光束。之后的科研人员针对 IG 光束及其衍生光束的特性<sup>[5-6]</sup>、IG 光束的产生方法<sup>[7-10]</sup>及 IG 光束在大气湍流信道下的传输特性<sup>[11-15]</sup>展开了深入探究。其中,IG 光束的产生方法包括腔内产生法和腔外产生法,由于腔内产生法精度要求较高<sup>[7]</sup>,而腔

外产生法中的液晶空间光调制器(LCSLM)法因操作方便、产生效果好的特点而逐渐成为主流方案。另外在传输特性方面,基于随机相位屏法,IG 标量光束<sup>[11-14]</sup>和矢量光束<sup>[15]</sup>在大气湍流信道中的闪烁指数、质心漂移和功率闪烁等特性得到研究,仿真结果表明,IG 光束与高斯光束相比具有更强的抵抗大气湍流的能力。

虽然 IG 光束大气湍流传输特性研究得到一定发展,为 IG 光束在抗湍流干扰方面应用提供了一定参考。但是,水流、温度和盐度等参数的变化使得海洋湍流信道相比大气湍流信道更为复杂,对光束的影响更加严重,相关 IG 光束在海洋复杂信道下传输特性还有较多理论和技术问题有待解决。根据文献调研可知,主要集中于海洋湍流模型的优化<sup>[16-18]</sup>和各类光束(随机电磁涡旋光束、径向锁相部分相干洛伦兹-高斯阵列光束、部分相干艾里光束等)仿真研究<sup>[19-23]</sup>,也包括一系列光束室内模拟湍流实验研究<sup>[24-25]</sup>和 IG 光束应用于水下光通信系统的研究<sup>[26]</sup>,但 IG 光束在海洋湍流中的光束及信号传输特性仿真研究相对较少<sup>[27]</sup>,尤其是实验研究更是暂未发现报道。

收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2023-07-09; 录用日期: 2023-08-11; 网络首发日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62231005)、国家重点研发计划(2022YFB2903400)、吉林省教育厅基金(JJKH20220746KJ、JJKH20220771KJ)

通信作者: \*zhangpeng@cust.edu.cn

为了评估和厘清 IG 光束抑制海洋湍流负面效应的影响,本文在模拟海洋湍流实验平台<sup>[28-33]</sup>的基础上,重新设计并搭建了模拟海洋湍流信道 IG 光信号传输及通信实验平台,平台可通过改变注水位置、水温及盐度等参数来模拟不同强度海洋湍流。在该实验平台的基础上,详细研究了不同海洋湍流强度下,IG 光束和高斯光束的闪烁指数、质心漂移、功率抖动、调制方波信号波形传输及通信误码率。

## 2 IG 光束产生及检测原理

### 2.1 IG 光场分布理论及相位灰度图制作原理

傍轴波方程是麦克斯韦电磁场方程的化简形式,表达式为

$$\nabla_{\perp}^2 \Phi(\mathbf{r}) - 2ik \frac{\partial \Phi(\mathbf{r})}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

将因斯方程代入傍轴波方程在椭圆坐标系下的解,得到 IG 模式<sup>[4]</sup>,表达式分别为

$$\begin{cases} \text{IG}_{p,m}^{e,\tau} = \frac{C\omega_0}{\omega(z)} C_p^m(i\xi, \tau) C_p^m(\eta, \tau) \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right] \exp\left\{i\left[kz + \frac{kr^2}{2R(z)}\right] - (p+1)\phi_g(z)\right\} \\ \text{IG}_{p,m}^{o,\tau} = \frac{S\omega_0}{\omega(z)} S_p^m(i\xi, \tau) S_p^m(\eta, \tau) \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right] \exp\left\{i\left[kz + \frac{kr^2}{2R(z)}\right] - (p+1)\phi_g(z)\right\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:e、o分别表示偶次、奇次; $\tau$ 为椭圆度参数; $p$ 为阶数, $m$ 为度数,且 $p$ 和 $m$ 具有相同的奇偶性。对于偶次情况, $p \geq m \geq 0$ ,对于奇次情况, $p \geq m \geq 1$ 。 $C_p^m$ 和 $S_p^m$ 是偶次和奇次因斯多项式,可由式(2)通过假设谐波展开得到,且 $p$ 、 $m$ 、 $C$ 、 $S$ 均为归一化常数。

根据以上公式,常见的 IG 光束光强分布和相位分布仿真结果如图 1(a)、(b)所示。由于 IG 光束的相位具有“两极性”,呈现出非“0”即“ $\pi$ ”的特点,所以相位图只有黑色和白色。

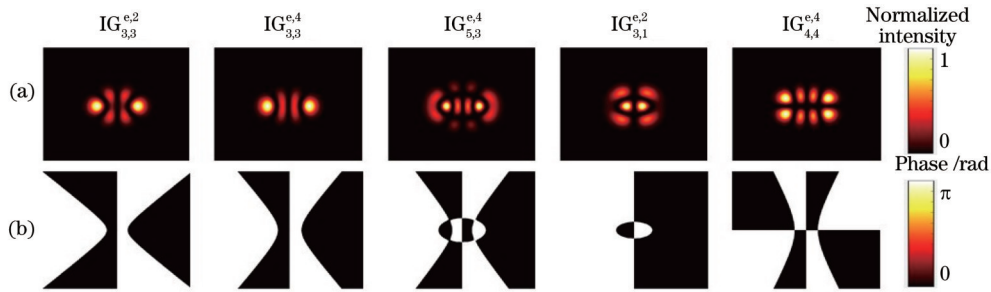


图 1 IG 光束光强分布和相位分布图。(a)光强;(b)相位

Fig. 1 Intensity and phase distributions of IG beams. (a) Intensity; (b) phase

相位灰度图法是利用液晶空间光调制器(LCSLM)产生结构光束的常用方法<sup>[34-35]</sup>。因此,为了产生 IG 光束的相位灰度图,首先需要提取出 IG 光束的相位信息,然后根据相位与相位灰度图的对应关系进行转换。其中:光束的相位值为 0 时,相位灰度图取 0 值;光束的相位值为  $2\pi$  时,相位灰度图取 255。以  $\text{IG}_{5,3}^{e,4}$  光束为例,相位灰度图如图 2(a)所示。为了进一

步提高 IG 光束的产生效果,引入闪耀光栅<sup>[35]</sup>的概念。闪耀光栅的重要意义在于,它将光强最大值的位置从零级移动到了其他有色散的光谱级上,可以让携带着相位信息的级次光强大大增加,这对于 IG 光束的生成有很大的帮助。IG 光束闪耀光栅相位灰度图如图 2(b)所示。

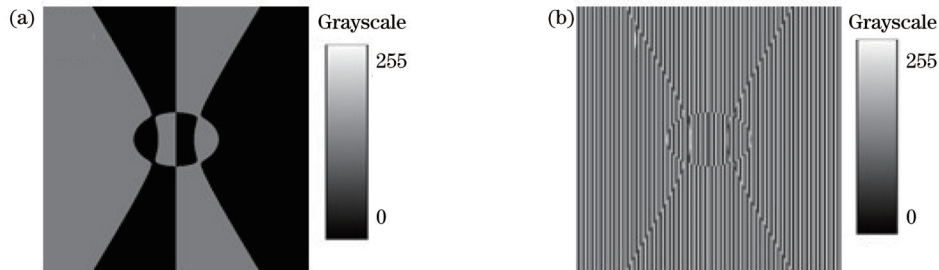


图 2  $\text{IG}_{5,3}^{e,4}$  光束相位灰度图。(a)基础相位灰度图;(b)闪耀光栅相位灰度图

Fig. 2 Basic phase grayscale map of  $\text{IG}_{5,3}^{e,4}$ . (a) Basic phase grayscale map; (b) phase grayscale map of shining grating

### 2.2 实验闪烁指数和质心漂移计算方法

为了量化 IG 光束在海洋湍流信道中的传输特性,利用相机采集 IG 光束经过海洋湍流后的多帧光强信息,利用软件计算闪烁指数<sup>[36]</sup>和质心漂移。

闪烁指数  $\sigma^2$  可通过光束的光强计算得到,表示光束经过扰动后的抖动情况。考虑到 IG 光束的中心存在无光强区,故闪烁指数选取孔径平均闪烁指数,计算公式<sup>[37]</sup>为

$$\sigma^2(z') = \frac{\left\langle \left( \iint I(x, y) dx dy \right)^2 \right\rangle}{\left\langle \iint I(x, y) dx dy \right\rangle^2} - 1. \quad (3)$$

质心漂移  $\delta$  表示光束经过扰动后光强质心的偏移量,为了简化质心漂移计算,将静水信道下的光强质心设为坐标原点,计算公式<sup>[38]</sup>为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\iint xI(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \\ y_0 = \frac{\iint yI(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \\ \delta = (x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2 \end{cases}. \quad (4)$$

### 2.3 实验波形失真度计算方法

为了量化 IG 光束调制信号在海洋信道中的受干扰程度,衡量不同湍流信道、不同调制频率下的方波信

号失真情况,根据参考文献<sup>[39]</sup>,给出波形失真度计算方法。

周期信号实际波形与其最优期望波形间残差的有效值和最优期望波形交流分量有效值之比,即对于周期为  $T$  的已知信号  $x(t)$ ,其实际波形函数为  $y(t)$ 。 $y(t)$  相对于最优期望波形的总失真度  $D_T$  定义为

$$D_T = \frac{\rho}{f_r}, \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为实际波形与其最优期望波形间残差的有效值;  $f_r$  为最优期望波形交流分量有效值。具体计算方法和过程可参考文献<sup>[39]</sup>。

该方法首先通过波形平移,让被测波形与理想波形近似对准,消除因器件响应时间导致的时间差,然后通过最小二乘拟合,在幅值上与被测波形进行拟合,从而得到被测波形的最佳拟合曲线,进而计算得到任意波形的失真度。因此使用该方法来评价 IG 光束调制信号波形的失真程度是合理且有效的。

## 3 IG 光束及信号传输实验结构

### 3.1 IG 光束模拟海洋湍流信道传输实验结构

为了从实验角度探究 IG 光束在海洋湍流信道中的传输特性,设计并搭建如图 3 所示的实验结构,主要分为 3 个部分:1)IG 光束产生部分;2)模拟海洋湍流信道部分;3)光束接收部分。

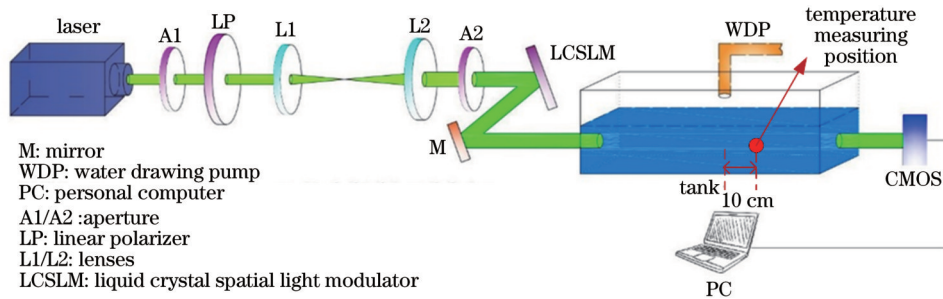


图 3 IG 光束模拟海洋湍流信道传输实验结构示意图

Fig. 3 Experimental structure diagram of IG beams transmission in simulated ocean turbulent channel

1)IG 光束产生部分中,激光器选用波长为 532 nm 的半导体光源。光束经过光阑 A1、线偏振片 LP、准直扩束镜组、光阑 A2 到达 LCSLM。光阑 A1 和 A2 的作用为光束整形和滤除杂散光,使其呈现高斯光束。透镜 L1 和 L2 共焦点放置,共焦点位于透镜组中间,降低光束发散角,起到扩束效果,降低 IG 光束传输时的波束展宽。入射光束经过 LCSLM 上加载的相位灰度图,经过衍射原理产生预期光束(IG<sub>5,3</sub><sup>4</sup>光束)。

2)模拟海洋湍流信道部分中,在参考文献<sup>[32]</sup>中,通过注入热水和盐水的方式使得折射率发生随机波动,模拟了海洋湍流。因此,亚克力水箱配合抽水泵、热水、食盐等材料模拟海洋湍流信道,其中水箱尺寸分别为 1.5 m×0.6 m×0.3 m,注水后水面高度为

0.1 m,初始注水量约为 90 L。光束入水中心距水面距离为 0.05 m。此部分可通过改变注水高度、水温及盐度等参数来模拟不同强度海洋湍流<sup>[40]</sup>。

其中,改变注水高度来模拟不同强度的动能耗散率下的海洋湍流<sup>[32]</sup>。将水利用抽水泵注入水箱,注入水箱的水与水箱中原有的水均为淡水,且无温度差。抽水泵抽水量为 1 L/min,注水口直径约为 0.8 cm。控制抽水泵注水口位于光路正上方,距水面的高度分别为 3 cm、5 cm、7 cm。

另外,改变注水的水温来模拟不同强度的温度方差耗散率下的海洋湍流。注水口距水面 3cm。将水流注入处、沿着光路方向右侧 10 cm 位置设置为温度测量点,利用测温枪测得水温分别为 40.1 °C、50.3 °C、



60.2 °C, 水箱中水温为 16.2 °C。

最后改变盐度模拟不同强度的温度和盐度诱导下的海洋湍流。注水口距水面 3 cm。水箱中原有的水为淡水, 后注入的盐度分别为 1 g/dm<sup>3</sup>、5 g/dm<sup>3</sup>、10 g/dm<sup>3</sup>。

3) 光束接收部分中, 利用 CMOS 相机采集 IG 光束光强信息, 计算闪烁指数和质心漂移; 利用光功率计模拟探测器接收功率抖动情况。虽然计算得到的闪烁指数和功率计测得的功率抖动均表示光束受湍流影响后的影响程度, 但两者从概念上来说并不相等。又因为相机采集到的光强最大值恒为“255”, 无法体现接收功率的实际变化范围, 故测量了接收功率信息。为了增加计算结果的准确性, 利用软件控制采样间隔为

0.1 s, 共采集 100 张图像信息。采样总时长为 10 s, 该过程中注入水箱中的水量约为 0.17 L, 远小于水箱中原有水量 90 L。

### 3.2 IG 光束调制信号模拟海洋湍流信道传输实验结构

在 3.1 节基础上, 为了进一步探究 IG 光束调制信号在海洋湍流信道下的传输性能, 利用信号发生器及信号放大模块直接调制 IG 光束, 所调制信号为方波信号, 经过水箱传输后的调制光信号通过 APD 和示波器采集波形信息。实验结构示意图如图 4 所示。与光束传输实验类似, 该实验亦可分为 3 个部分: 1) IG 光束调制方波信号产生; 2) 海洋湍流信道设置; 3) 调制信号接收。

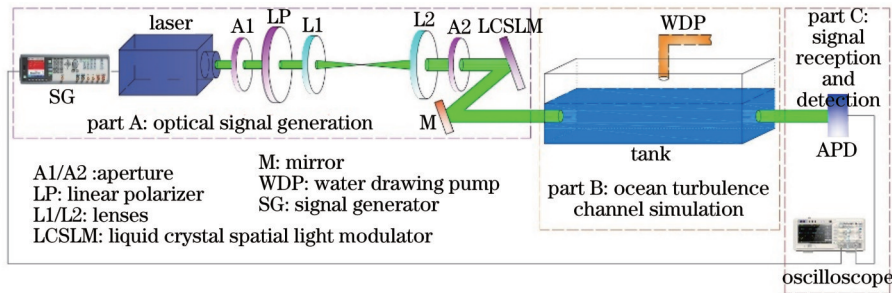


图 4 IG 光束调制方波信号海洋湍流信道传输实验结构示意图

Fig. 4 Experimental structure diagram of modulated square wave signal of IG beams transmission in ocean turbulence channel

IG 光束调制方波信号频率设置为 0.5~3 MHz, 占空比为 50%, 振幅为 0.5 V<sub>pp</sub>。其中信号发生器型号为 Keysight 81150A。

## 4 IG 光束信号传输及通信实验结果与讨论

### 4.1 IG 光束模拟海洋湍流信道传输实验结果与讨论

将 CMOS 相机分别置于水箱前后, 在静水信道

中, IG 光束和高斯光束如图 5 所示。其中, IG 光束入水前功率为 4.9 mW, 出水后功率为 2.4 mW, 入水前光斑尺寸约为 4 mm, 出水后光斑尺寸约为 6 mm。受到散射和吸收的影响, 光束的能量降低, 且发生弥散效应。

为了明确不同实验条件的温度情况, 利用测温枪在图 3 所示测温点测量不同实验信道的温度, 具体温度如表 1 所示。

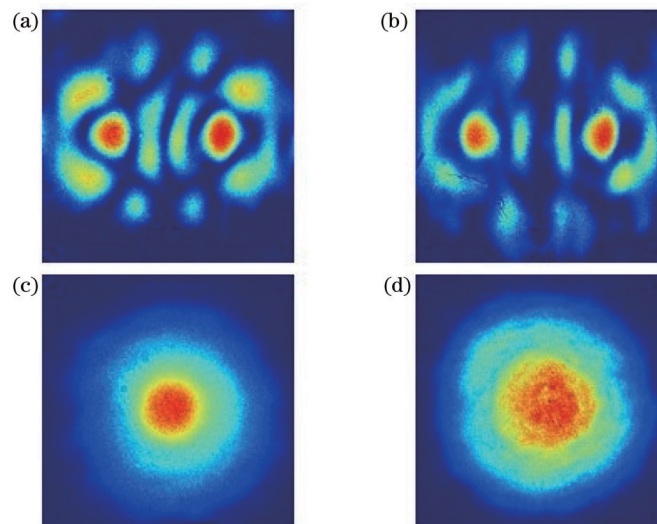


图 5 水箱前后的 IG 光束和高斯光束光强分布图。(a) IG 光束水箱前; (b) IG 光束水箱后; (c) 高斯光束水箱前; (d) 高斯光束水箱后  
Fig. 5 Intensity distribution of IG beams and Gaussian beams before and after the tank. (a) IG beam before the tank; (b) IG beam after the tank; (c) Gaussian beam before the tank; (d) Gaussian beam after the tank

表 1 各信道下观测点处水温

Table 1 Water temperature at the observation point under each channel

Channel situation	Level of intensity	Water temperature / $^{\circ}\text{C}$
Height	3 cm	16.2
	5 cm	16.2
	7 cm	16.2
Temperature	40.1 $^{\circ}\text{C}$	17.8
	50.3 $^{\circ}\text{C}$	19.5
	60.2 $^{\circ}\text{C}$	21.2
Salinity	1 $\text{g}/\text{dm}^3$	16.1
	5 $\text{g}/\text{dm}^3$	16.0
	10 $\text{g}/\text{dm}^3$	16.0

通过计算不同信道下 IG 光束和高斯光束的闪烁指数和质心漂移,分别得到不同注水高度、水温、盐度信道下的结果,如柱状图 6~8 所示。

在不同注水高度信道中:当注水高度为 3 cm 时,IG 光束的闪烁指数比高斯光束低 15.6%,质心漂移低 12.4%;当注水高度提升至 7 cm 时,IG 光束的闪烁指数比高斯光束低 20.8%,质心漂移低 17.4%。故与高斯光束相比,IG 光束均具有更低的闪烁指数和质心漂移,且随着注水高度的升高即海洋湍流强度增加,IG 光束的传输性能改善能力得到增强。从光强分布来看,相比高斯光束,IG 光束光强分布更为稀疏,各部分光强大小更为平均,导致了更低的闪烁指数增长量。而对称分布的双峰式结构更有益于控制质心漂移的涨幅。实验结果也与先前仿真工作结果<sup>[40]</sup>的变化趋势基本保持一致。

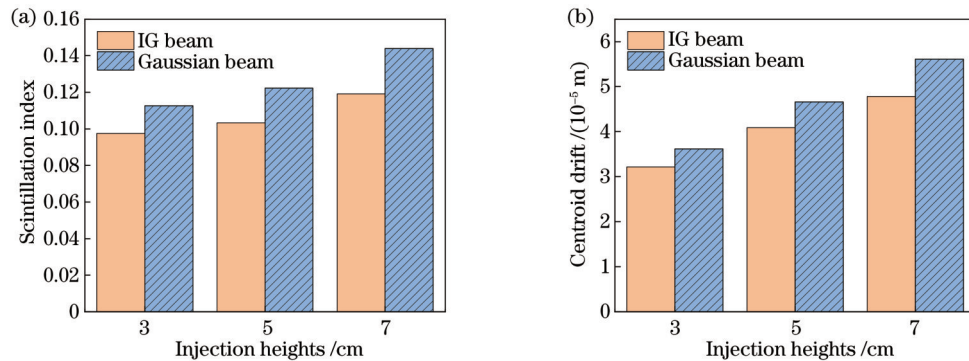


图 6 不同注水高度信道下闪烁指数和质心漂移柱状图。(a)闪烁指数;(b)质心漂移

Fig. 6 Histograms of scintillation index and centroid drift in different water injection heights. (a) Scintillation index; (b) centroid drift

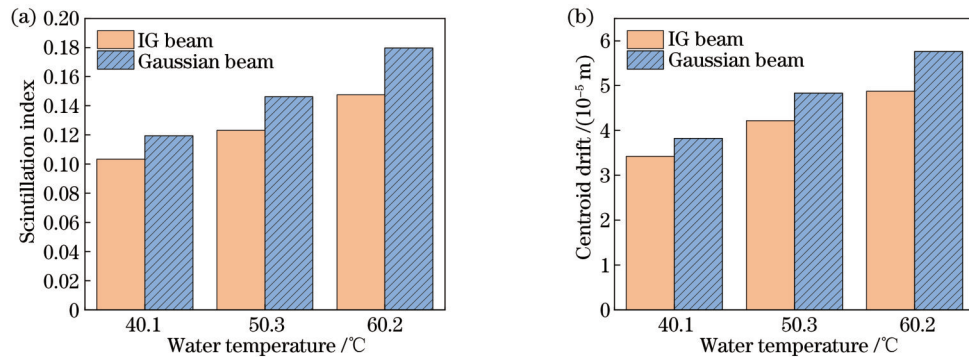


图 7 不同水温信道下的闪烁指数和质心漂移柱状图。(a)闪烁指数;(b)质心漂移

Fig. 7 Histograms of scintillation index and centroid drift in different water temperatures. (a) Scintillation index; (b) centroid drift

与不同注水高度信道呈现出的结果类似:当水温为 40.1  $^{\circ}\text{C}$  时,IG 光束的闪烁指数低于高斯光束 15.5%,质心漂移降低 11.6%;当水温为 60.2  $^{\circ}\text{C}$  时,IG 光束的闪烁指数低于高斯光束 21.8%,质心漂移降低 18.3%。故与高斯光束相比,IG 光束均具有更低的闪烁指数和质心漂移,且随着水温的升高即海洋湍流强度增加,IG 光束的传输性能改善能力得到增强。

从图 8 可以看出:当盐度为 1  $\text{g}/\text{dm}^3$  时,与高斯光束相比,IG 光束的闪烁指数低 14.2%,质心漂移低

12.6%;当盐度增加至 10  $\text{g}/\text{dm}^3$  时,较高斯光束,IG 光束的闪烁指数低 21.0%,质心漂移低 18.0%。故与高斯光束相比,IG 光束均具有更低的闪烁指数和质心漂移,且随着盐度的增加即海洋湍流强度增加,IG 光束的传输性能改善能力得到增强。

接着在水箱后利用光功率计模拟探测器实际接收功率情况,测量不同注水高度信道、水温信道、盐度信道下的功率抖动。每隔 0.5 s 采样一次,共采样 20 个点,整体数据测量时间为 10 s。功率抖动方差如表 2

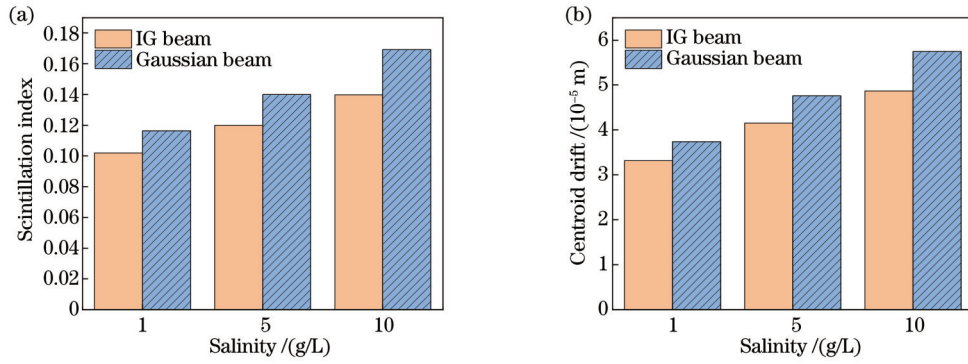


图 8 不同盐度信道下闪烁指数和质心漂移柱状图。(a) 闪烁指数; (b) 质心漂移

Fig. 8 Histograms of scintillation index and centroid drift in different salinities. (a) Scintillation index; (b) centroid drift

所示。

由表 2 可知,以水温信道为例,当水温从 40.1 °C 增加至 60.2 °C 时,IG 光束平均功率降低 11.7%,大于高斯光束 6.7% 的降幅。故随着海洋湍流强度的增加,IG 光束和高斯光束的平均功率发生降低,且 IG 光束相比高斯光束具有更严重的降幅。出现该情况的原因是高斯光束的光强分布更加集中,且过渡更为平缓,而 IG 光束光强分布较为分散,高光强区与低光强区间隔明显,受到湍流影响后发生衰减使得总光强快速下降。

在抖动方差方面,IG 光束整体拥有更低的数值,

且随着水温从 40.1 °C 增加至 60.2 °C,与高斯光束相比,IG 光束的功率抖动方差性能优势从 12.9% 降低至 3.7%。说明 IG 光束虽然能量受损更为严重,但抖动程度更小,且随着湍流强度增加,IG 光束接收功率抖动改善能力减弱。结合 IG 光束的光强分布特点,分析出现该现象的原因可能是受到湍流衰减作用,低光强区在整体结构中的占比更低,导致了更低的接收功率抖动方差。该现象与先前仿真工作中的重叠<sup>[40]</sup>变化趋势类似,均为随着海洋湍流强度增加,IG 光束改善能力减弱。

表 2 不同海洋湍流强度下的接收功率抖动方差

Table 2 Received power jitter variance at different ocean turbulence intensities

Channel situation	Level of intensity	Average power of IG beam /dBm	Average power of Gaussian beam /dBm	Jitter variance of IG beam	Jitter variance of Gaussian beam
Height	3 cm	2.68	4.47	0.14	0.20
	5 cm	2.49	4.26	0.24	0.28
	7 cm	2.39	4.2	0.48	0.51
Temperature	40.1 °C	2.56	4.12	0.31	0.35
	50.3 °C	2.46	3.74	0.4	0.43
	60.2 °C	2.26	3.84	0.54	0.56
Salinity	1 g/dm <sup>3</sup>	2.78	4.25	0.18	0.25
	5 g/dm <sup>3</sup>	2.69	4.16	0.34	0.38
	10 g/dm <sup>3</sup>	2.49	4.03	0.46	0.51

#### 4.2 IG 光束调制信号模拟海洋湍流信道传输实验结果与讨论

如图 4 所示的实验结构,利用示波器同时采集理想方波信号和实际波形。图 9 为 7 cm 高度信道下,IG 光束和高斯光束的 3 MHz 波形实测图,其中蓝色曲线为信号发生器产生的理想方波信号,红色曲线为实际信号。由曲线可知,实际波形与理想波形之间存在时间差,根据文献<sup>[39]</sup>及式(6),可以消除该时间差对结果的影响。

利用示波器采集得到的波形信息,信道设置与前文所述相同,计算 0.5~3 MHz 调制频率下的波形失真度,每种情况采样 10 次,计算得到平均失真度变化情况,如图 10~12 所示。

由图 10~12 可知,当信道分别设置为注水高度为 3 cm、水温为 40.1 °C、盐度为 1 g/dm<sup>3</sup> 时,调制频率为 3 MHz 时的 IG 光束信号波形失真度分别低于高斯光束 7.4%、6.3% 和 6.7%,增加湍流强度,信道设置为注水高度为 7 cm、水温为 60.2 °C 和盐度为 10 g/dm<sup>3</sup> 时,调制频率为 3 MHz 时的 IG 光束信号波形失真度分别低于高斯光束 6.9%、5.6% 和 6.3%。故在相同的信道中,频率为 0.5~3 MHz 的 IG 光束调制波形失真度均低于高斯光束,且随着海洋湍流强度增加,与高斯光束相比,IG 光束方波信号的波形失真度性能差距减小。

可以认为波形失真有可能是散射的存在使得信号传输时出现了多径延时效应<sup>[41]</sup>。一方面,光子的延时



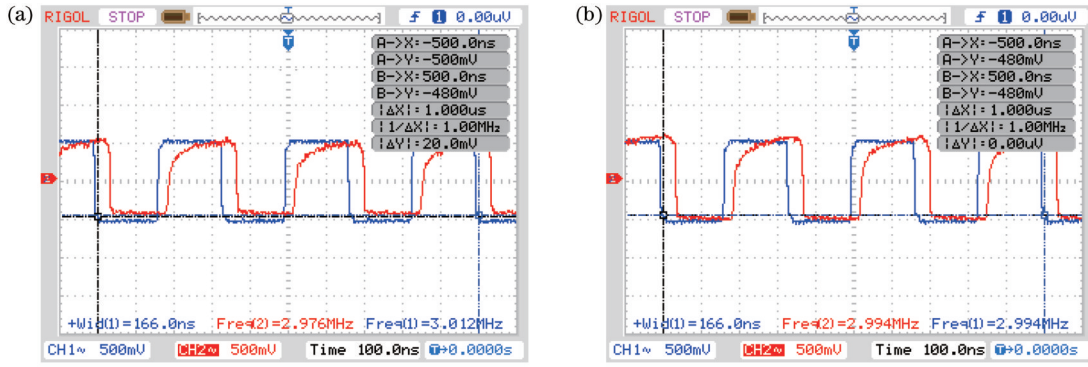


图 9 注水高度 7 cm 信道下 3 MHz 调制方波信号波。(a)IG 光束; (b)高斯光束

Fig. 9 3 MHz modulated square wave signal waveform in a channel with a height of 7 cm. (a) IG beam; (b) Gaussian beam

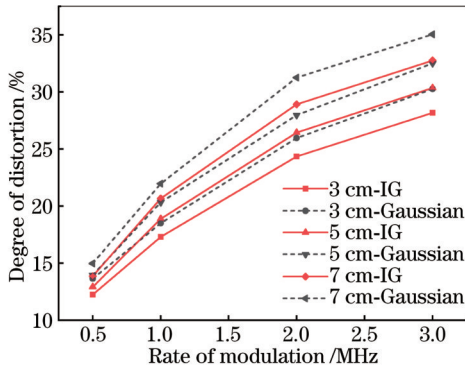


图 10 不同注水高度信道下 IG 光束和高斯光束 0.5~3 MHz 信号失真度变化曲线

Fig. 10 Variation curves of 0.5~3 MHz signal distortion of IG beams and Gaussian beams in different water injection heights

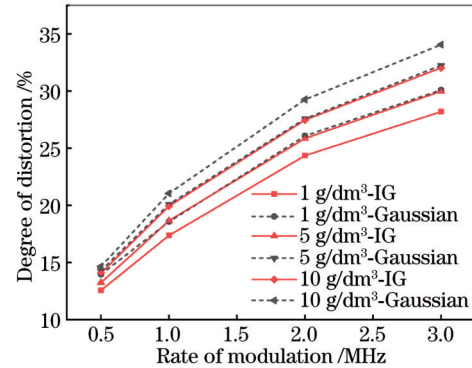


图 12 不同盐度信道下 IG 光束和高斯光束 0.5~3 MHz 信号失真度变化曲线

Fig. 12 Variation curves of 0.5~3 MHz signal distortion of IG beams and Gaussian beams in different salinities

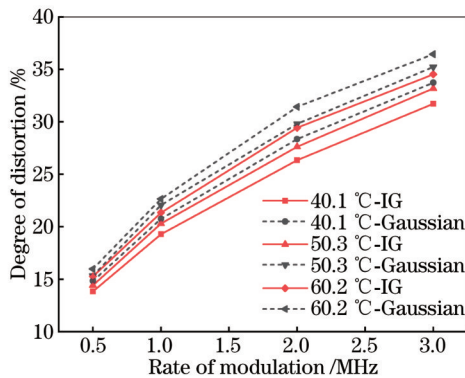


图 11 不同水温信道下 IG 光束和高斯光束 0.5~3 MHz 信号失真度变化曲线

Fig. 11 Variation curves of 0.5~3 MHz signal distortion of IG beams and Gaussian beams in different water temperatures

作用使得接收信号具有一定的上升沿和下降沿,导致信号失真。且随着海洋湍流强度增加,散射效应更加严重<sup>[42]</sup>,即信号失真更加严重。另一方面,相比高斯光束,IG 光束在散射信道中具有更好的抵抗能力<sup>[43]</sup>,在本实验中表现为更低的波形失真度。

### 4.3 IG 光束 OOK 调制信号模拟海洋湍流信道通信实验结果与讨论

图 13 为 IG 光束与高斯光束的室内水下通信对比

实验示意图,调制格式是 OOK,通信速率为 7.5 Mbit/s,通信距离和图 4 一致(水箱长度为 1.5 m),信道环境与图 4 一致(水温、盐度等),基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)完成信号加载、信号解调、判决计算、误码率(BER)计算。IG 光束与高斯光束在不同水下信道的误码率如图 14~16 所示。

由图 14~16 可知,随着接收功率的减小以及模拟海洋湍流的影响,IG 和高斯光束在不同注水高度、不同温度、不同盐度水下信道中的误码率均逐渐升高。在相同信道下,用 IG 光束作为载波的通信误码率性能要优于高斯光束载波。在误码率为  $3.8 \times 10^{-3}$  (前向纠错阈值)时,IG 光束在三种水下信道的通信性能比高斯光束均有所提高:在不同注水高度信道中最多提高了 0.8 dB;在不同温度信道中最多提高了 4 dB;在不同盐度信道中最多提高了 2.5 dB。而且,随着注水高度的增加、温度的升高以及盐度的增加,IG 光束相比于高斯光束的通信性能优势也愈发增大。

通信实验结果与 4.2 节的波形传输实验结果相符,进一步证明了 IG 光束相比于高斯光束在海洋湍流信道中的通信优势,体现了 IG 光束的抗海洋湍流特性。

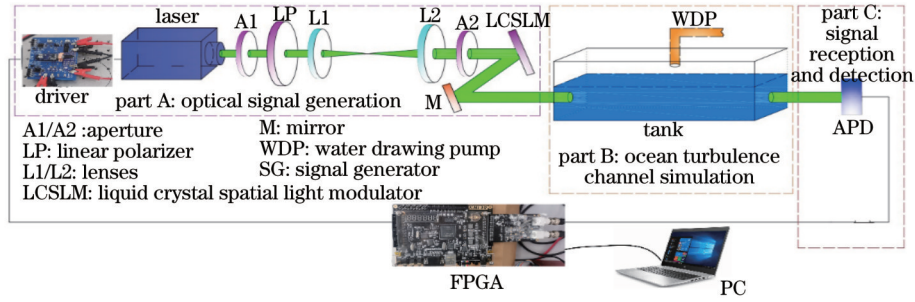


图 13 IG 光束与高斯光束的室内水下通信对比实验示意图

Fig. 13 Schematic diagram of underwater communication comparison experiment between IG beams and Gaussian beams

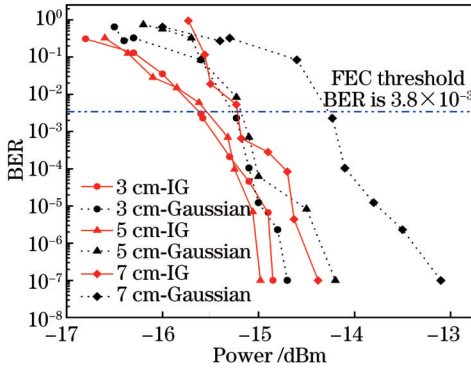


图 14 不同注水高度信道下 IG 光束和高斯光束通信误码率与接收功率关系曲线

Fig. 14 Relationship curves between BER and received power of IG and Gaussian beams under different water injection heights

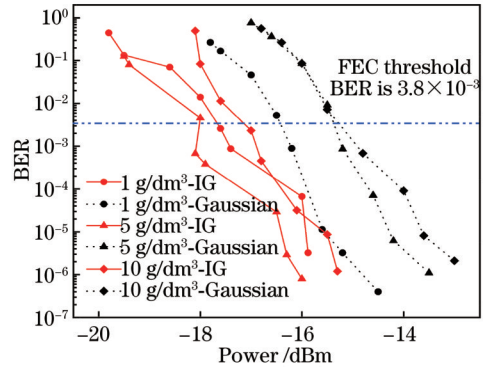


图 16 不同盐度信道下 IG 光束和高斯光束通信误码率与接收功率关系曲线

Fig. 16 Relationship curves between BER and received power of IG and Gaussian beams in different salinities

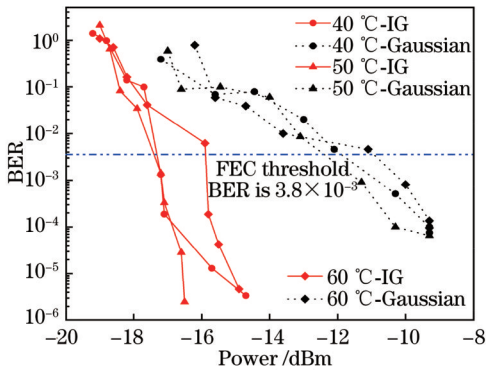


图 15 不同水温信道下 IG 光束和高斯光束通信误码率与接收功率关系曲线

Fig. 15 Relationship curves between BER and received power of IG and Gaussian beams under different temperatures

## 5 结 论

IG 光束在复杂信道传输中具有较好的抗干扰能力。本文研究了 IG 光束在海洋湍流信道下的光束信号传输及通信特性,设计并搭建了模拟海洋湍流信道和 IG 光信号传输及通信实验平台,通过改变注水高度、水温及盐度等参数来模拟不同强度海洋湍流。实验结果表明:IG 光束的闪烁指数、质心漂移、功率抖动均优于高斯光束,且随着海洋湍流强度增加,IG 光束

闪烁指数和质心漂移改善能力增强,功率抖动改善能力降低。在不同模拟海洋湍流中,相同频率的 IG 光束调制波形失真度整体低于高斯光束。在各种信道条件下,IG 光束的通信误码率性能均优于高斯光束。该实验研究结果将填补 IG 光束在海洋湍流信道实验方面的空白,后续可将 IG 光束应用于实际通信系统中展开研究。

## 参 考 文 献

- [1] 栾晓晖. 海洋湍流对激光束传播特性的影响研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020: 1-3.  
Luan X H. Study on the influence of ocean turbulence on laser beam propagation characteristics[D]. Xi'an: Xidian University, 2020: 1-3.
- [2] 杜星, 丁桂璇, 杜浩, 等. 海洋湍流中厄米-高斯光束的传输特性研究[J/OL]. 光学学报: 1-14[2023-07-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20230509.1153.154.html>.
- [3] Du X, Ding G X, Du H, et al. Transmission characteristics of Hermite-Gaussian beam in oceanic turbulence[J/OL]. Acta Optica Sinica, 1-14[2023-07-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20230509.1153.154.html>.
- [4] Forbes A, de Oliveira M, Dennis M R. Structured light[J]. Nature Photonics, 2021, 15(4): 253-262.
- [5] Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C. Ince - Gaussian beams[J]. Optics Letters, 2004, 29(2): 144-146.
- [6] Nomoto S, Goldstein A, Vyas R, et al. Polarization properties of Ince - Gaussian laser beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(12): 2261-2265.
- [6] Yang H B, Wu Y, Lin Z J, et al. Self-accelerating and self-



- healing of Ince-Gaussian-like beams[J]. *Results in Physics*, 2022, 32: 105060.
- [7] Schwarz U T, Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C. Observation of Ince-Gaussian modes in stable resonators[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1870-1872.
- [8] Chen X Y, Yang X N, Chen B Y, et al. Study on 1.9  $\mu\text{m}$  structured lasers based on Ince - Gaussian modes superposition with multi-modulation by different directions off-axis dual-end-pump[J]. *Optics Communications*, 2023, 530: 129020.
- [9] Bentley J B, Davis J A, Bandres M A, et al. Generation of helical Ince-Gaussian beams with a liquid-crystal display[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(5): 649-651.
- [10] Wang D M, Li Y, Hu X B, et al. Tailoring Ince-Gaussian arrays based on a computer-generated hologram[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(24): 7172-7176.
- [11] Eyyuboğlu H T. Propagation analysis of Ince - Gaussian beams in turbulent atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2290-2296.
- [12] Gu X M, Chen L J, Krenn M. Phenomenology of complex structured light in turbulent air[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11033-11050.
- [13] Castañeda E N, Alarcón R R, Vázquez J C G, et al. Ince-Gauss Photons in Turbulent Atmosphere: effect of quantum numbers on beam resilience[EB/OL]. (2021-08-27)[2023-02-03]. <https://arxiv.org/abs/2108.12322>.
- [14] Elmabruk K. Effect of system parameters on power scintillation of Ince Gaussian beam in turbulent atmosphere[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(12): 126105.
- [15] Sun Z, Wang J M, Li Z, et al. Stable propagation of Ince-Gaussian vector beams through atmospheric turbulence[J]. *Optics Communications*, 2022, 515: 128193.
- [16] Nikishov V V, Nikishov V I. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index[J]. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2000, 27(1): 82-98.
- [17] Li Y, Zhang Y X, Zhu Y. Oceanic spectrum of unstable stratification turbulence with outer scale and scintillation index of Gaussian-beam wave[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7656-7672.
- [18] 贺锋涛, 王妮, 张建磊, 等. 各向异性海洋湍流对外差式 DPSK 无线光通信系统的性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1901004.  
He F T, Wang N, Zhang J L, et al. Performance of heterodyne DPSK wireless optical communication system under anisotropic ocean turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1901004.
- [19] Yue P, Luan X H, Yi X, et al. Beam-wander analysis in turbulent ocean with the effect of the eddy diffusivity ratio and the outer scale[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(4): 556-562.
- [20] Xu J, Zhao D M. Propagation of a stochastic electromagnetic vortex beam in the oceanic turbulence[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 57: 189-193.
- [21] Liu D J, Wang Y C. Evolution properties of a radial phased-locked partially coherent Lorentz-Gauss array beam in oceanic turbulence[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 103: 33-41.
- [22] Jin Y, Hu M J, Luo M, et al. Beam wander of a partially coherent Airy beam in oceanic turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(8): 1457-1464.
- [23] 王明军, 屠思凯. 基于反向传播神经网络盲均衡算法的水下涡旋光复用系统性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(17): 1701001.  
Wang M J, Tu S K. Performance research on underwater vortex optical multiplexing system based on back propagation neural network blind equalization algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(17): 1701001.
- [24] Li D C, Chen C C, Liaw S K, et al. Performance evaluation of underwater wireless optical communication system by varying the environmental parameters[C]//*Photonics*. MDPI, 2021, 8(3): 74.
- [25] Zhan H C, Wang L, Wang W N, et al. Experimental analysis of adaptive optics correction methods on the beam carrying orbital angular momentum mode through oceanic turbulence[J]. *Optik*, 2021, 240: 166990.
- [26] Robertson E, Pires D G, Dai K J, et al. Constant-envelope modulation of Ince-Gaussian beams for high bandwidth underwater wireless optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(16): 5209-5216.
- [27] 张凤, 张明明, 胡友友, 等. Ince-Gaussian 光束在海洋湍流中的传输特性[J]. *应用激光*, 2022, 42(11): 92-98.  
Zhang F, Zhang M M, Hu Y Y, et al. Propagation characteristics of Ince-Gaussian beams in ocean turbulence[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(11): 92-98.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Vali Z, Gholami A, Ghassemloo Z, et al. Experimental study of the turbulence effect on underwater optical wireless communications[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8314-8319.
- [31] Karahroudi M K, Moosavi S A, Mobashery A, et al. Performance evaluation of perfect optical vortices transmission in an underwater optical communication system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 9148-9154.
- [32] Weng Y, Guo Y J, Alkhazragi O, et al. Impact of turbulent-flow-induced scintillation on deep-ocean wireless optical communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19): 5083-5090.
- [33] Wang Y, Zhang P, Wang X L, et al. Performance analysis on free space underwater data transmission using Bessel-Gaussian beams in a simulated ocean channel with various effects[J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 125969.
- [34] 李永旭. 结构光场的特性及其在光通信中的应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.  
Li Y X. Characteristics of structured light field and its application in optical communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [35] 王心怡. 基于空间光调制器高效动态生成全矢量光场的研究[D]. 南京: 南京大学, 2018: 24-32.  
Wang X Y. Research on efficient dynamic generation of full vector light field based on spatial light modulator[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 24-32.
- [36] Wang F, Liu X L, Liu L, et al. Experimental study of the scintillation index of a radially polarized beam with controllable spatial coherence[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(9): 091102.
- [37] Castañeda E N. Elliptical vortex beams through turbulent atmosphere[D]. Dayton: University of Dayton, 2020: 47-61.
- [38] Andrews L C, Phillips R L, Young C Y. Laser beam scintillation with applications[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [39] 孙璟宇, 王中宇, 梁志国. 任意波形失真度的一种评价方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(1): 33-37.  
Sun J Y, Wang Z Y, Liang Z G. Evaluation method for distortion of arbitrary waveform[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(1): 33-37.
- [40] 戴辉, 张鹏, 何爽, 等. 螺旋因斯-高斯光束海洋湍流信道传输与通信特性仿真研究[J/OL]. *激光与光电子学进展*: 1-12[2023-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20230822.0944.009.html>.  
Dai H, Zhang P, He S, et al. Simulation study on transmission and communication characteristics of helical Ince-Gaussian

- beams in ocean turbulent channel[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*: 1-12[2023-07-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20230822.0944.009.html>.
- [41] 向王钧. 大气对水平激光通信链路信号时域展宽特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 11-13.  
Xiang W J. Study on time-domain broadening characteristics of atmospheric signal to horizontal laser communication link[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 11-13.
- [42] Bogucki D, Domaradzki A, Zaneveld J R V, et al. Light scattering induced by turbulent flow[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2258: 247-255.
- [43] Li Z, Wang J M, Sun Z, et al. Robust transmission of Ince-Gaussian vector beams through scattering medium[J]. *Optik*, 2022, 257: 168766.

## Experimental Study on the Transmission Characteristics of Ince-Gaussian Beams and Modulated Signals in Ocean Turbulent Channels

Zhang Peng<sup>1\*</sup>, Dai Hui<sup>1</sup>, He Shuang<sup>1</sup>, Fan Yunlong<sup>1</sup>, Chen Hang<sup>1</sup>, Wang Yuanxin<sup>1,2</sup>,  
Nan Hang<sup>1</sup>, Tong Shoufeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

<sup>2</sup>*College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China*

### Abstract

**Objective** Ince-Gaussian (IG) beams are widely used in the fields of beam generation and application due to their unique beam structure and phase distribution. In free-space optical communication, especially in atmospheric turbulent channels, IG beams show better anti-interference ability than Gaussian beams. However, the ocean turbulent channel environment is more complex and changeable, and the impact on the beams is more serious. To study the beam and signal transmission and communication characteristics of IG beams in ocean turbulent channels, we systematically study the transmission characteristics of IG and Gaussian beams in simulated ocean turbulent channels. The results provide a reference for IG beams to be applied in underwater laser communication.

**Methods** The transmission and communication experimental platforms of IG optical signals in simulated ocean turbulent channels are designed and built. The platform can simulate ocean turbulence with different intensities by changing parameters such as water injection height, water temperature, and salinity. Firstly, the intensity scintillation index, centroid drift, and detector received power of IG beams and Gaussian beams are experimentally compared under different ocean turbulence intensity channels. Then the waveform distortion characteristics of the modulated signals of the two beams are further studied by modulating the square wave signals of 0.5 - 3 MHz frequency. Finally, the communication performance evaluation experiment of IG and Gaussian beams is carried out by loading modulation 7.5 Mbit/s signals with field programmable gate array programming. According to the above comparative results, the transmission and communication characteristics of IG beams in ocean turbulent channels are obtained.

**Results and Discussions** The underwater transmission and communication performance of IG beams and Gaussian beams are compared, including scintillation index, centroid drift, power jitter variance, waveform distortion, and the bit error rate (BER). When the water temperature increases from 40.1 °C to 60.2 °C, the performance advantage between the scintillation index of the IG beams and Gaussian beams increased from 15.5% to 21.8%. The performance advantage between centroid drift increased from 11.6% to 18.3%. However, compared with the Gaussian beams, the power jitter variance performance advantage of the IG beams reduced from 12.9% to 3.7%. The performance advantage between the waveform distortion of the square wave signal of the IG beams at the modulation frequency of 3 MHz decreases from 6.3% to 5.6% when the water temperature increases. Compared with Gaussian beams, the communication systems with IG beams as carriers have better BER performance. When the BER is  $3.8 \times 10^{-3}$  (forward error correction threshold), the communication performance of IG beams in three kinds of underwater channels is better than that of Gaussian beams. The communication performance of the IG beam is improved by 0.8 dB at most in channels with different water injection heights, improved by 4 dB at most in channels with different temperatures, and improved by 2.5 dB at most in channels with different salinity. Moreover, the communication performance advantages of IG beams compared with Gaussian beams enhance with the increase in water injection height, temperature, and salinity.

**Conclusions** The results of transmission experiments show that the scintillation index, centroid drift, and power jitter of

the IG beams are better than those of the Gaussian beams. With the increase in ocean turbulence intensity, the improved ability of scintillation index and centroid drift of IG beams is enhanced, while the improved ability of power jitter is decreased. In different simulated ocean turbulence, the distortion of the modulated square wave of IG beams is lower than that of the Gaussian beams at the same frequency. The experimental results show that, when the BER is  $3.8 \times 10^{-3}$ , the communication performance of IG beams in channels with different water injection heights, different temperatures, and different salinity is 0.8 dB, 4 dB, and 2.5 dB higher than that of Gaussian beams, respectively. In summary, IG beams have a unique advantage in transmission and communication characteristics compared with Gaussian beams in ocean turbulent channels.

**Key words** Ince-Gaussian beams; ocean turbulence; scintillation index; centroid drift; power jitter; waveform distortion