

## 用于水下光通信高维调制与解调的轨道角动量叠加态

刘海达, 黑小兵, 杨洋, 谢元昊, 盖磊, 顾永建, 肖芽, 李文东\*

中国海洋大学物理与光电工程学院, 山东 青岛 266100

**摘要** 通过涡旋光束的轨道角动量的叠加态的识别研究, 提出了一种在水下无线光通信中运用涡旋光束进行高维信息调制与解调的方法。给出了两种涡旋光束的叠加态的识别方法和流程, 并对水信道传输后的叠加态的光强分布图进行了识别, 得出叠加态中的拓扑荷数, 以此通过实验论证了轨道角动量叠加态可在低拓扑荷数情况下实现 16 维信息的调制与解调, 为涡旋光束在水下无线光通信中的应用提供了一种可行方案。

**关键词** 大气光学与海洋光学; 水下无线光通信; 涡旋光束; 轨道角动量; 空间光调制器; 图像识别

中图分类号 TN929.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220952

## Orbital Angular Momentum in a Superposition State for High-Dimensional Modulation and Demodulation in Underwater Optical Communication

Liu Haida, Hei Xiaobing, Yang Yang, Xie Yuanhao, Gai Lei, Gu Yongjian, Xiao Ya, Li Wendong\*

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China

**Abstract** This paper presents a method for high-dimensional information modulation and demodulation using a vortex beam for underwater wireless optical communication by identifying the superposition state of orbital angular momentum in the vortex beam. The method and process of identifying the superposition states of two vortex beams are described. The topological charge numbers in the superposition states are obtained based on the light intensity distribution diagram of the superposition states after water channel transmission. Based on the results, it is experimentally demonstrated that the superposition state of orbital angular momentum can achieve the modulation and demodulation of 16-dimensional information under low-topological-charge conditions. Thus, this study provides a feasible scheme for applying vortex beams in underwater wireless optical communication.

**Key words** atmospheric and oceanic optics; underwater wireless optical communication; vortex beam; orbital angular momentum; spatial light modulator; image recognition

## 1 引言

轨道角动量(OAM)是光子的一种自由度, 自 1992 年被发现以来, 受到了研究者的广泛关注<sup>[1]</sup>, 并在光通信<sup>[2-5]</sup>、量子通信<sup>[6-9]</sup>、超分辨率成像<sup>[10-12]</sup>和高精度测量<sup>[13-15]</sup>等多个领域开展了应用基础研究。理论上 OAM 具有无穷维正交本征态, 可实现高维信息编码, 因此应用光的 OAM 自由度, 可以极大提高光通信的信息容量和通信速度, 在大气自由空间<sup>[2,4]</sup>和光纤信

道<sup>[3,9]</sup>中取得了很好的研究成果。在水下无线光通信中, 应用 OAM 也可以较大程度地提高通信速率, 但由于水信道的散射、吸收和湍流等影响, 开展 OAM 调制的水下光通信面临更大的挑战。

2016 年, Baghdady 等<sup>[16]</sup>实验演示了一个传输距离为 2.96 m 的水下无线光通信链路并利用 OAM 实现了空间复用, 实验所用单态拓扑荷数  $l$  的绝对值分别为 8 和 4。同年, Ren 等<sup>[17]</sup>通过多路复用 OAM 光束实现了传输距离为 1.2 m 且传输速率为 40 Gbit/s 的链路, 提

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-04-06; 录用日期: 2022-04-14; 网络首发日期: 2022-04-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(202165008, 842041012, 841912027)、国家自然科学基金(61701464, 61575180, 912122020, 932021070)、中国海洋大学青年人才计划(861901013107)

通信作者: \*liwd@ouc.edu.cn

升了水下光通信系统的容量。2017年, Wang等<sup>[18]</sup>采用  $l$  分别为  $-2, -1, 1, 2$  的单态进行实验研究, 发现最优发射 OAM 模态主要受干扰能量和有效能量衰减的限制。2018年, Wang等<sup>[19]</sup>用  $l$  分别为  $1, 3, 5$  的单态在水箱的三种不同水面高度下进行实验, 验证了 OAM 在介质水-空气-水的数据传输中具有良好的传输性能。2019年, Zhao等<sup>[20]</sup>在一个装有蒸馏水的  $1\text{ m}$  长的矩形水箱中进行实验, 单态拓扑荷数  $l$  的取值范围为  $5\sim 15$ , 证明了携带 OAM 的贝塞尔-高斯光束具有能够抵抗水环境干扰的特性。2021年, Zhang等<sup>[21]</sup>设计并搭建一个在  $6\text{ m}$  的水下环境下支持两个信道复用的水下无线光通信(UWOC)系统(实验所用 OAM 的拓扑荷数为  $3, -3$ )。目前这些基于涡旋光束调制的水下通信方案大部分是用携带单个拓扑荷数的量子态调制信息。这些方案在进行大容量的高维信息调制时, 若使用携带低拓扑荷数的量子态, 信号在传输过程中易发生串扰; 若使用大拓扑数的量子态, 信号在传输过程中又容易受到环境的干扰, 这两种调制信息的方式都会增加通信的误码率。

本文提出了一种利用涡旋光束的低拓扑荷数的叠加态实现水下通信高维调制与解调的方法。首先, 从理论上分析了光强分布图中花瓣数、极值点等特征与拓扑荷数的组合之间的关系, 并给出了涡旋光束叠加态的识别流程, 用来解决水下光通信的解调问题; 然后, 设计了水信道传输的涡旋光束叠加态的实验研究装置图; 最后, 给出了采用 16 种叠加态进行高维信息调制, 利用它们的光强分布图识别进行信息解调的方法, 并通过实验验证了该方法的可行性。该研究有助于推动水下高维光通信的发展。

## 2 基本原理

涡旋光束叠加态用于水下无线光通信的关键在于实现高维信息的调制与解调。在调制方面, 目前已有非常成熟的技术, 实验上只要编写出相应的相位图, 然后加载到空间光调制器(SLM)上, 就能灵活地制备出相应的涡旋光束叠加态<sup>[22-23]</sup>。在解调方面, 由于水信道的散射、吸收和湍流等因素会对光束产生干扰, 给量子态的识别<sup>[24]</sup>带来了较大的困难。本文基于一种鲁棒性较强的涡旋光束叠加态的识别方法<sup>[25]</sup>, 构建了一套信息解调方案, 以适用于水下光通信的需要。以下将详细地阐述该方案的解调原理和操作流程。

### 2.1 涡旋光束叠加态的解调原理

先将信息调制为两种涡旋光束的不同拓扑荷数组合  $(l_1, l_2)$  的 OAM 叠加态, 其中径向量子数为 0、拓扑荷数为异号, 即  $p_1 = p_2 = 0$  和  $l_1 l_2 < 0$ , 这种调制方式的设计可以极大地降低叠加态的识别难度<sup>[22]</sup>, 有效地提高识别的准确度。信息解调时, 只需将 OAM 叠加态中的拓扑荷数组合识别出来, 即可得到调制的信息。

下面具体介绍涡旋光束叠加态的解调原理。

拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束是一种典型的携带 OAM 的涡旋光束。在  $p = 0$  的条件下, 携带拓扑荷数  $l$  的沿  $z$  方向传播的 LG 光束的复振幅分布可以表示为

$$LG_0^l = \sqrt{\frac{2}{\pi|l|!}} \frac{1}{\omega(z)} \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right)^{|l|} \exp\left[ \frac{-r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp\left[ -\frac{ikr^2 z}{2(z^2 + z_R^2)} - il\varphi - i(|l| + 1) \arctan(z/z_R) \right], \quad (1)$$

式中:  $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + z^2/z_R^2}$  是传播距离  $z$  处的光束半径;  $\omega_0$  是光束在  $z = 0$  处的束腰半径;  $k = 2\pi/\lambda$  是波数;  $\lambda$  是波长;  $z_R = \pi\omega_0^2/\lambda$  是瑞利距离。具有相同束腰半径  $\omega_0$  的两种不同 LG 光束叠加态可以表示为

$$|\psi_{sp}\rangle = \sin\theta |l_1, 0\rangle + \cos\theta |l_2, 0\rangle, \theta \in [0, \pi/2], \quad (2)$$

该叠加态对应的强度分布可以表示为

$$I = \sin^2\theta I_1 + \cos^2\theta I_2 + \sin 2\theta \operatorname{Re}(LG_0^{l_1} * LG_0^{l_2}), \quad (3)$$

式中:  $LG_0^{l_1} * LG_0^{l_2} = \sqrt{I_1 I_2} \exp[i(l_1 - l_2)\varphi + i(|l_1| - |l_2|) \arctan(z/z_R)]$ ;  $I_1 = |LG_0^{l_1}|^2$ ;  $I_2 = |LG_0^{l_2}|^2$ ;  $\operatorname{Re}(u)$  表示取  $u$  的实部。由于干涉项  $\operatorname{Re}(LG_0^{l_1} * LG_0^{l_2})$  可以看出叠加态的光强分布呈现花瓣状。极值强度的方位角位置位于  $\varphi_n = (n\pi - \Delta\xi_z)/(l_1 - l_2)$ ,  $n = 0, 1, \dots, 2|l_1 - l_2| - 1$ ,  $\Delta\xi_z = (|l_1| - |l_2|) \arctan(z/z_R)$ 。

因为 LG 光束叠加态的拓扑荷数、叠加系数等信息都包含在强度分布图的花瓣数、极值大小中, 所以通过分析光强分布图的这些主要特征, 就可以识别式(2)给出的 LG 光束叠加态, 具体步骤如图 1 所示。

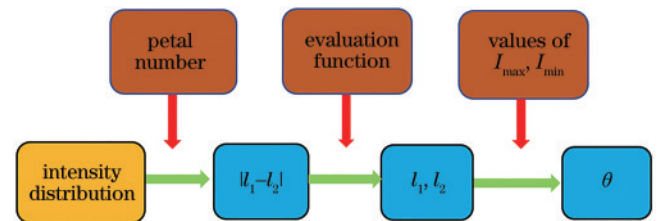


图 1 通过测量光强分布来识别两种 LG 模式叠加态的步骤。第一行 3 个框代表每个步骤中使用光强分布的特征, 第二行右边的 3 个框代表每一步获得的信息

Fig. 1 Steps of identifying superposition states of two different LG modes by measuring light intensity distribution. Three boxes in the first row represent characteristics of light intensity distribution used, and three boxes on right of the second row represent information obtained at each step

首先, 根据 LG 光束叠加态的光强图观测到的花瓣数来得到拓扑荷数  $(l_1, l_2)$  的可能组合。用极值强度的方位角位置可以证明花瓣数  $N$  与叠加态拓扑荷数的关系  $N = |l_1 - l_2|$ 。此时, 当  $l_1 l_2 < 0$  时, 如果  $N$  为奇

数,  $(l_1, l_2)$  可能的组合数量等于  $N-1$ ; 如果  $N$  为偶数,  $(l_1, l_2)$  可能的组合数量等于  $N-2$ , 其最小的拓扑荷数  $\min(|l_1|, |l_2|)$  被限制在  $[1, \text{Round}(N/2)]$  中, 也就是说  $\min(|l_1|, |l_2|) \in [1, \text{Round}(N/2)]$ , 其中  $\text{Round}(u)$  表示将数值  $u$  向下舍入到最接近的整数。

然后, 为了在这  $N-1$  (或者  $N-2$ ) 种可能的组合数中找到与实际值最接近的组合  $(l_1, l_2)$ , 本文在理论上依据  $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$  构建评价函数  $\gamma$ :

$$\gamma = \left( \frac{\sqrt{I_{\max}^e} + \sqrt{I_{\min}^e}}{2\sqrt{I_1}} \right)^2 + \left( \frac{\sqrt{I_{\max}^e} - \sqrt{I_{\min}^e}}{2\sqrt{I_2}} \right)^2 - 1, \quad (4)$$

式中, 实验极值强度  $(I_{\max}^e, I_{\min}^e)$  和理论强度  $(I_1, I_2)$  之间满足关系  $I_{\max}^e = (\sin\theta\sqrt{I_1} + \cos\theta\sqrt{I_2})^2$  和  $I_{\min}^e = (\sin\theta\sqrt{I_1} - \cos\theta\sqrt{I_2})^2$ 。当所选组合与理论组合一致时,  $\gamma$  取最小值。实验上, 可根据  $\gamma$  的最小值确定  $(l_1, l_2)$ 。

最后, 将上述步骤确定的  $(l_1, l_2)$  与强度极值相结合, 通过以下公式获得叠加系数  $\theta$  的大小, 即

$$\theta^e = \arcsin \frac{\sqrt{\alpha}(1 + \sqrt{\beta})}{\sqrt{\alpha(1 + \sqrt{\beta})^2 + (1 - \sqrt{\beta})^2}}, \quad (5)$$

式中:  $\alpha = I_2/I_1$ ;  $\beta = I_{\max}^e/I_{\min}^e$ 。

为了精确地表征本文提出的识别方法的准确性, 可进一步分析实验识别的量子态  $\rho^e$  和理论制备态  $\rho^i$  之间的保真度  $F$ , 数学上<sup>[26]</sup>可以表示为

$$F = (\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\rho^e} \rho^i \sqrt{\rho^e}})^2. \quad (6)$$

## 2.2 涡旋光束叠加态的识别流程

根据 LG 叠加态的识别理论结合数据处理方法对叠加态的光强分布图进行识别, 流程如下:

1) 通过实验, 采集到 LG 光束叠加态的光强分布图像以及背景光图像。

2) 从光强分布图像中减去背景光图像, 以滤除背景光噪声的影响, 然后使用最大类间方差法计算图像的灰度阈值, 将其转换为二值图像, 使用形态学开、闭运算以及面积筛选法去除噪声白斑, 进而识别出花瓣数量以及花瓣所在的区域。

3) 对所有花瓣区域, 计算区域中每个像素  $5 \times 5$  邻域内灰度的平均值, 该花瓣中邻域灰度平均值最大的像素点即是光强最大值处, 由此得到每片花瓣内的光强最大值及其位置。

4) 根据得到的光强最大值及其位置数据, 使用最小二乘法圆拟合中的 Pratt 方法<sup>[27]</sup>拟合出一个圆, 得出拟合圆的半径  $r_m$ 。

5) 对灰度值进行归一化处理, 在拟合圆周上均匀地取 360 个采样点, 计算各采样点邻域内的强度值, 所得最大和最小强度的均值即分别是实验测得的

$I_{\max}^e$  和  $I_{\min}^e$ 。

6) 根据上面得到的花瓣数得到拓扑荷数可能的组合, 然后将所有组合代入式 (4), 得到所有  $(l_1, l_2)$  可能组合的评价函数值。通过对比评价函数的最小值, 识别出  $(l_1, l_2)$  的组合。

7) 结合识别出的  $(l_1, l_2)$  以及上面的计算结果, 可以计算出叠加系数  $\theta$  和保真度  $F$ 。

## 3 涡旋光束叠加态用于水下光通信调制解调的实验研究

### 3.1 水信道传输涡旋光束叠加态的实验装置

图 2 描述了水信道传输涡旋光束叠加态的实验装置。激光器输出的高斯光束垂直入射到光纤耦合器上, 其中实验所用半导体激光器波长为 488 nm, 通过光纤耦合器的激光依次经过半波片 (HWP) 和偏振片, HWP 用来调节光强大小, 偏振片将光转化为水平偏振光来满足 SLM 的需要。为了充分利用 SLM 的有效面积, 该实验通过扩束镜将光束扩束到 SLM 所需要的直径大小, 然后准直入射到具有  $1272 \times 1024$  个像素元的反射式纯相位 SLM (滨松: X13138; 像素尺寸:  $12.5 \mu\text{m}$ ) 上来制备式 (2) 表示的任意 LG 光束的叠加态。反射镜 1 和 2 是镀银反光镜, 用来调节光束方向。根据 Bolduc 等<sup>[22]</sup>提出的相位全息图精确解, 利用 Matlab 编程生成相位全息图, 通过同时控制其相位和振幅, 优化了涡旋光束的质量。相位全息图的光栅常数为 7, 束腰为 50 pixel, 通过改变拓扑荷数  $l_1, l_2$ , 来生成两种模式的叠加态的涡旋光束。水信道选用的是长为 3 m 的水管, 水的衰减系数为 0.12/m, 水体类型为 Jerlov-IB<sup>[28]</sup>。为了验证解调方案的鲁棒性, 实验中将 NaCl 晶体按比例加入水中, 来模拟不同盐度的水下环境。最后用 CCD 探测相应的涡旋光束, CCD 前透镜焦距为 75 mm。

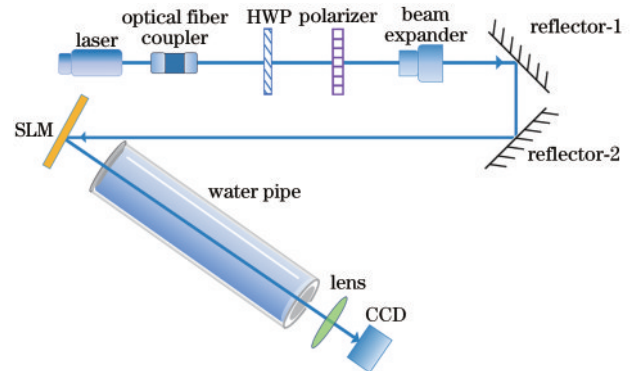


图 2 水信道传输的涡旋光束叠加态的实验装置图

Fig. 2 Experimental device diagram of vortex beam's superposition state transmitted in water channel

### 3.2 水信道传输的涡旋光束叠加态的识别过程

在这里, 以  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|-6, 0\rangle + |3, 0\rangle)$  态为例来详细阐

述涡旋光束叠加态的实验识别过程。实验获得的光强分布图如图 3(a)所示,首先,将此图滤除背景光噪声。然后,将彩色图像转化为二值图像,并使用形态学方法

去除噪声点,如图 3(b)所示,图中白斑区域即是花瓣所在区域,共 9 个花瓣。

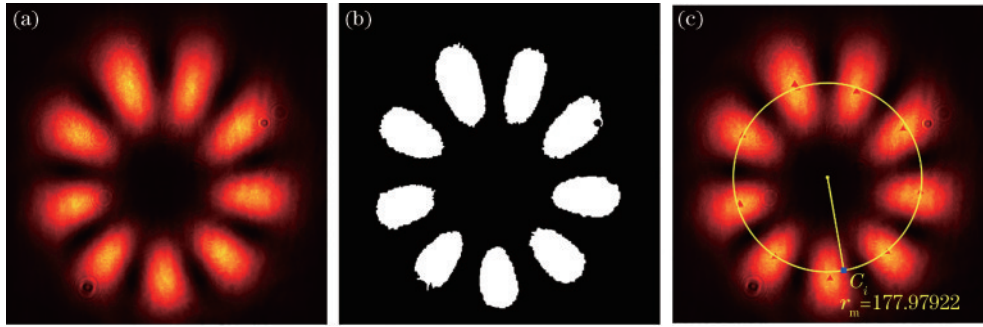


图 3 实验图处理。(a)滤除背景光噪声的 LG 叠加态光强分布图;(b)二值化结果,用于识别花瓣数量以及花瓣所在区域;(c)最大值提取以及 Pratt 方法圆拟合<sup>[27]</sup>

Fig. 3 Processing of experimental images. (a) LG superposition state's light intensity distribution diagram whose background light noise is filtered ;(b) binarization result which is used to identify number and region of petals; (c) maximum extraction and Pratt method circle fitting<sup>[27]</sup>

接着,为了更准确地确定极值强度的位置 and 值,以每个像素为中心,将强度分布划分为多个大小为  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$  的子区域。对于给定的花瓣,最大强度的位置被认为是其最大平均强度子区域的中心[图 3(c)中三角形标记点]。然后根据光强最大值点拟合出一个圆,所得拟合半径为  $r_m = 177.97922 \text{ pixel}$ ,拟合相对误差约为 0.02691。对圆周灰度值进行归一化处理,在圆周上均匀取 360 个采样点,并以这些点邻域内 9 个像素点的灰度平均值作为采样点灰度值。根据花瓣方位变化周期从这 360 个采样点中选取每周期的最大强度以及最小强度,所得最大和最小强度的均值即分别是实验测得的  $I_{\max}^e$  和  $I_{\min}^e$ 。

最后,将理论光强值与实验测得结果  $I_{\max}^e$  和  $I_{\min}^e$  代入式(4),可以得到  $(l_1, l_2)$  所有可能组合的评价函数值,如图 4 所示。可以看出,当  $(l_1, l_2)$  组合为(6, 3)时,评价函数值最小,所以识别出的叠加态的拓扑荷数组合为  $(-6, 3)$ 。此时,可以算出  $\theta^e = 0.87521$ ,保真度约为 0.992。

### 3.3 水信道中涡旋光束叠加态的调制与解调实验

水下光通信中,需要在发射端对信息进行编码和

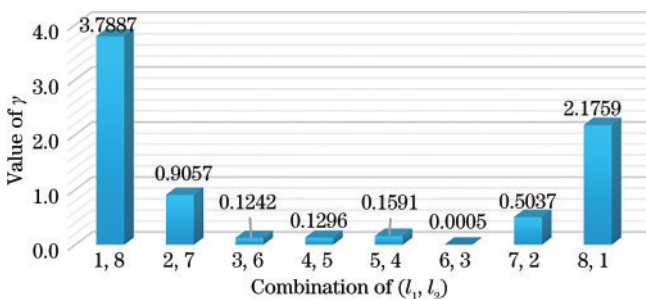


图 4 不同  $(l_1, l_2)$  组合时的评价函数值

Fig. 4 Evaluation function values in different combinations of  $(l_1, l_2)$

调制,在接收端对信息解调和解码;编码与解码可以使用光通信原理中的 Reed-Solomon 码、LDPC 码等方法,本文主要研究利用涡旋光束叠加态及前面提出的识别方法进行信息的调制与解调的方案。

在叠加态调制方案的设计中,本文首先根据花瓣数  $N$  与拓扑荷数  $l$  的关系  $N = |l_1 - l_2|$ ,在花瓣数 5 到 12 之间,每种花瓣数选取不同拓扑荷数组合的 8 种涡旋光束叠加态,一共 64 种。在图 2 的水信道传输的涡旋光束叠加态的实验平台上,利用 SLM 制备涡旋光束叠加态,并用 CCD 探测得到这 64 种叠加态的光强分布图,以花瓣数 5 为例,如图 5 所示。然后,综合考虑实验图的图像质量和可分辨特性,本实验从 64 种中选取 16 种作为调制状态。

图 6 所示的 16 种涡旋光束叠加态是经过筛选之后用于信息调制的状态,可以调制 16 维的高维信息,图 6 所示数值模拟得到的理论图和实验图轮廓上基本一致。接着,本文进行了更加细致的叠加态的状态调制和水信道传输实验。首先计算这 16 种叠加态的相位全息图并将其加载到 SLM 中产生相应的 LG 光束叠加态,即完成各维度信息的调制过程,然后经过水信道,利用 CCD 探测得到 16 种叠加态的光强分布图,最后,利用前面的识别方法进行叠加态轨道角动量拓扑荷数的计算和识别,即开展信息解调过程。

在信息解调的过程中,本文利用前面介绍的识别方法识别叠加态轨道角动量的拓扑荷数,图 7 是这 16 种叠加态的实验分析结果。图 7(a)显示了评价函数  $\gamma$  以及评价函数的最小值与第二个最小值的比率  $\kappa$ 。 $\gamma$  值越小,说明识别结果与预期匹配程度较高; $\kappa$  值越小,说明期望的拓扑荷数越容易从其他拓扑荷数中分辨出来。可以看出,这两个参数都很小,说明了实验结

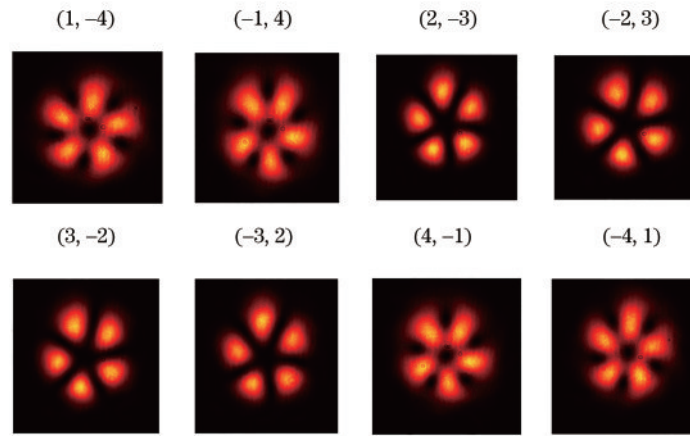


图 5 经水信道传输的涡旋光束叠加态光强图

Fig. 5 Light intensity diagram of vortex beam's superposition states transmitted through a water channel

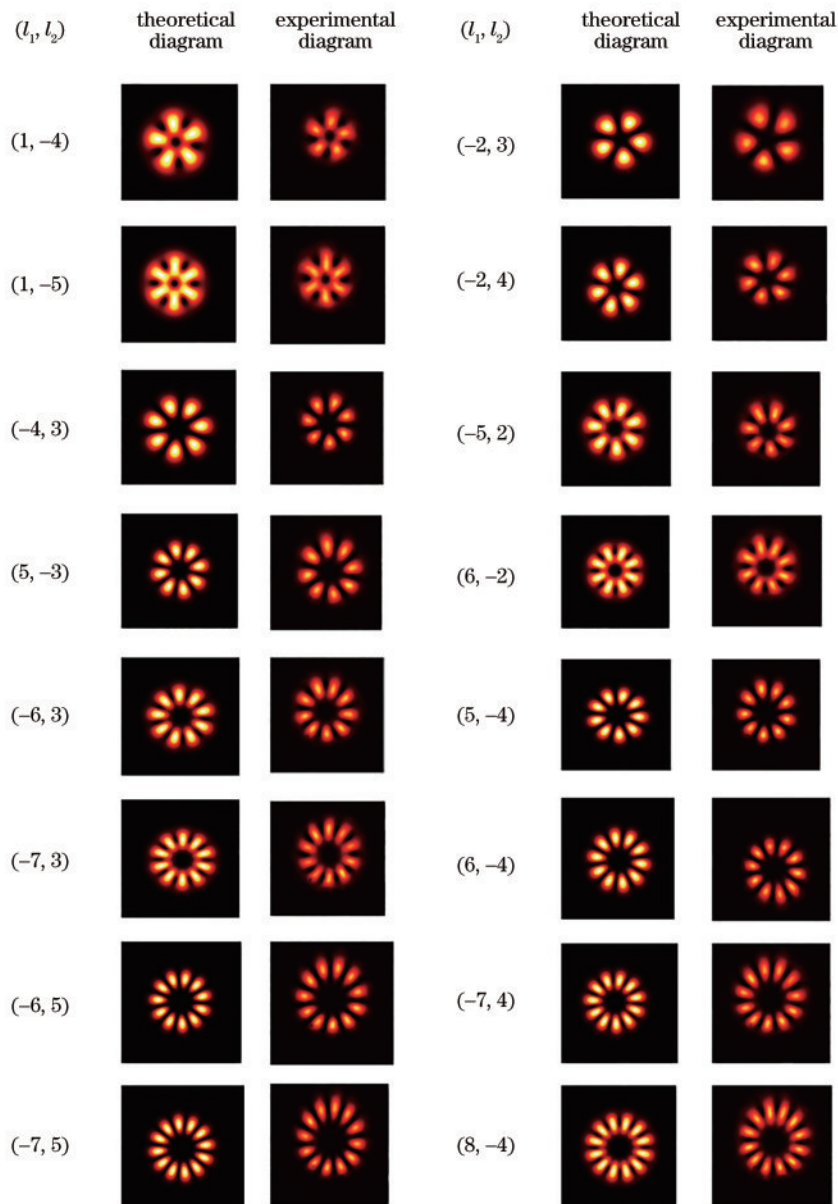


图 6 光强分布的实验结果图与理论图

Fig. 6 Theoretical diagrams and experimental results of light intensity distribution

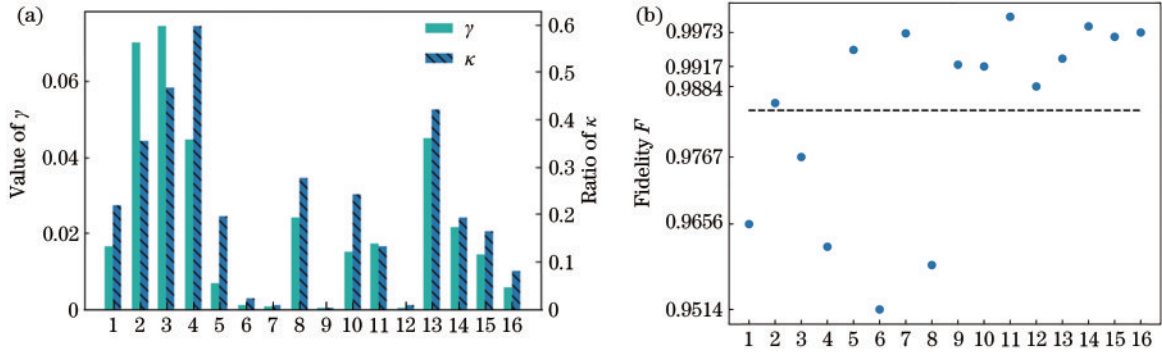


图 7 16 种涡旋光束叠加态的识别结果。(a) 16 种量子态的评价函数最小值  $\gamma$  和评价函数最小值与第二个最小值的比率  $\kappa$ ; (b) 16 种量子态的保真度  $F$ ; 其中 1 到 16 分别代表拓扑荷数组合  $(1, -4), (-2, 3), (1, -5), (-2, 4), (-4, 3), (-5, 2), (5, -3), (6, -2), (-6, 3), (5, -4), (-7, 3), (6, -4), (-6, 5), (-7, 4), (-7, 5), (8, -4)$

Fig. 7 Recognition results of superposition states of 16 vortex beams. (a) Minimum value of evaluation function  $\gamma$  of 16 quantum states and ratio  $\kappa$  between minimum value of evaluation function and its second minimum value; (b) fidelity  $F$  of 16 quantum states; 1 to 16 respectively represent topological charge combinations of  $(1, -4), (-2, 3), (1, -5), (-2, 4), (-4, 3), (-5, 2), (5, -3), (6, -2), (-6, 3), (5, -4), (-7, 3), (6, -4), (-6, 5), (-7, 4), (-7, 5),$  and  $(8, -4)$

果和理论相符,也证实了此识别方法的可行性。为了进一步证明该方法的准确性,本文还计算了这些态的保真度,计算结果显示这些态的平均保真度约为 0.9865,如图 7(b)的虚线所示。以上结果表明,所调制的量子态经过水信道传输后仍可以较好地通过叠加态的光强度分布图解调出来。

根据前文提到的理论和实验结果,采用两个拓扑荷数的绝对值在 8 以内的涡旋光束的叠加态,可以实现 16 种组合的产生和识别。将这种涡旋光束叠加态

的产生和识别过程应用于水下无线光通信时,可以实现光通信中 16 维的调制与解调。如果采用单一拓扑荷数的涡旋光束,由于临近量子数的涡旋光束在水信道中传输时产生串扰,量子数绝对值 8 以内的涡旋光束最多可以调制 6 维信息。比如文献[29]中为了避免串扰,采用了  $+6, +3, -3, -6$  的拓扑荷数的涡旋光束,调制了 4 维信息。因此,在实验复杂程度相似的情况下,叠加态在可调制维度上更占优势,同时比单态的涡旋光束也更加容易识别。

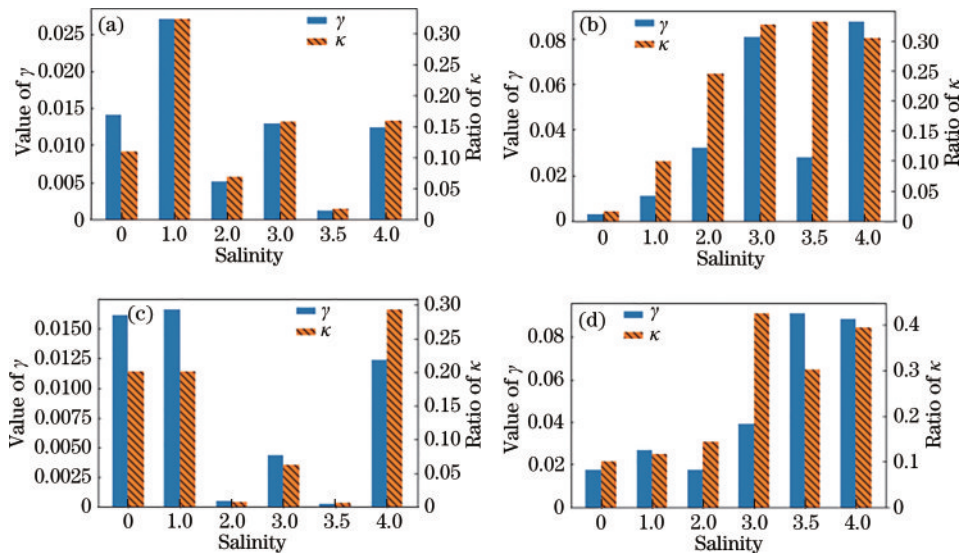


图 8 不同组合拓扑荷数在不同盐度水下的实验结果。(a)、(b)、(c)、(d)依次为  $(-3, 4), (-3, 5), (-4, 5), (-4, 6)$  的评价函数最小值  $\gamma$  和评价函数最小值  $\gamma$  与第二个最小值的比率  $\kappa$

Fig. 8 Experimental results of different combined topological charges under different salinities. (a), (b), (c), and (d) respectively represent minimum value of evaluation function  $\gamma$  of  $(-3, 4), (-3, 5), (-4, 5), (-4, 6)$  and ratio  $\kappa$  between minimum value of evaluation function  $\gamma$  and its second minimum value

通信时,以  $(1, -4), (-2, 3), (1, -5), (-2, 4), (-4, 3), (-5, 2), (5, -3), (6, -2), (-6, 3), (5, -4), (-7, 3), (6, -4), (-6, 5), (-7, 4), (-7, 5), (8, -4)$

这 16 种涡旋光束的叠加态分别调制 0000、0001、0010、...、1111 四比特共 16 维的信息,采用 SLM 在通信发射端对纠错编码后的数据信息进行调制,并在通

信接收端利用 CCD 采集光强信息,再采用本文所设计的识别方法解调信息,最后进行纠错解码,得到传递的原始信息。由于调制时,一个叠加态的光脉冲可以同时调制四比特的经典信息,并且此种调制方式运用了新的光子自由度,可以和之前振幅和频率等调制方式进行结合,实现水下通信系统中通信速率的进一步提升。

为了验证这种方案在水下光通信的鲁棒性,本文在水中加入 NaCl 晶体来模拟不同盐度的水下环境。在实验中,分析了 $(-3,4)$ 、 $(-3,5)$ 、 $(-4,5)$ 、 $(-4,6)$ 四种量子态在盐度分别为 0%、1%、2%、3%、3.5%、4% 的水信道中的解调效果,其中衰减系数分别为 0.12、0.23、0.29、0.31、0.33、0.37  $\text{m}^{-1}$ 。图 8 中显示了评价函数  $\gamma$  的最小值以及最小值和第二个最小值的比值  $\kappa$ 。很明显,在 4% 的盐度内,这四组态的  $\gamma$  值均小于 0.1,  $\kappa$  值均小于 0.4,显示了这一方案具有较好的鲁棒性,也进一步证实了本文方法在水下识别的可行性。另外,在实际环境中还将遇到背景光干扰、水体流动、湍流等影响,这时为了增强涡旋光束叠加态的识别性能,下一步工作中还将在本文的水下光通信技术的基础上继续开展加强背景光的滤除、利用光束跟踪技术抵抗光束的漂移抖动、借助自适应光学技术进行光波波前校正等技术的研究。

## 5 结 论

通过对 16 种涡旋光束的叠加态的识别研究,论证了利用涡旋光束的叠加态可以在低量子数的情况下实现高维信息的调制与解调。首先,通过理论推导给出了光强分布图中花瓣数、极值点位置等特征与拓扑荷数之间的关系,分析了涡旋光束叠加态中拓扑荷数组合的识别原理与流程;接着,结合实验光路图介绍了涡旋光束叠加态的产生方式,以及对经过水信道传输后的光强分布图的识别过程,分别对应于水下光通信中信息的调制与解调过程。通过解调结果可以看出,文中选择的 16 种涡旋光束的叠加态可以实现相互分辨,满足水下光通信中的高维调制与解调的应用需求,说明绝对值 8 以内的拓扑荷数的组合即可实现 16 维的高维调制,这为利用低量子数的涡旋光束实现抗串扰的水下光通信调制提供了新的可行方案,推动了水下无线高维光通信的发展。最后,为了验证该方案在光通信中的鲁棒性,在水下模拟不同盐度的环境中进行识别实验,本文用四种涡旋光束的轨道角动量的叠加态进行解调,证明了在模拟盐度为 0%~4% 的环境下可以解调出这四种态,验证了在不同盐度环境下此方案的良好鲁棒性。

## 参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [3] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [4] Yan Y, Xie G D, Lavery M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4876.
- [5] 南久航, 韩一平. 双路多进制涡旋光通信[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1206001.  
Nan J H, Han Y P. Dual-channel multiband vortex optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1206001.
- [6] Vallone G, D' Ambrosio V, Sponselli A, et al. Free-space quantum key distribution by rotation-invariant twisted photons[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(6): 060503.
- [7] Wang X L, Cai X D, Su Z E, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon[J]. *Nature*, 2015, 518(7540): 516-519.
- [8] Sit A, Bouchard F, Fickler R, et al. High-dimensional intracity quantum cryptography with structured photons[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1006-1010.
- [9] Xie Z W, Gao S C, Lei T, et al. Integrated (de)multiplexer for orbital angular momentum fiber communication[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 743-749.
- [10] Willig K I, Rizzoli S O, Westphal V, et al. STED microscopy reveals that synaptotagmin remains clustered after synaptic vesicle exocytosis[J]. *Nature*, 2006, 440(7086): 935-939.
- [11] Xie X S, Chen Y Z, Yang K, et al. Harnessing the point-spread function for high-resolution far-field optical microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(26): 263901.
- [12] Kozawa Y, Matsunaga D, Sato S. Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 86-92.
- [13] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- [14] Kravets V G, Schedin F, Jalil R, et al. Singular phase nano-optics in plasmonic metamaterials for label-free single-molecule detection[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(4): 304-309.
- [15] Li Y, Yu L, Zhang Y X. Influence of anisotropic turbulence on the orbital angular momentum modes of Hermite-Gaussian vortex beam in the ocean[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12203-12215.
- [16] Baghdady J, Miller K, Morgan K, et al. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9794-9805.

[1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of

- [17] Ren Y X, Li L, Wang Z, et al. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33306.
- [18] Wang W, Wang P, Cao T, et al. Performance investigation of underwater wireless optical communication system using M-ary OAMSK modulation over oceanic turbulence[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 7905315.
- [19] Wang A D, Zhu L, Zhao Y F, et al. Adaptive water-air-water data information transfer using orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8669-8678.
- [20] Zhao S M, Zhang W H, Wang L, et al. Propagation and self-healing properties of Bessel-Gaussian beam carrying orbital angular momentum in an underwater environment [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 2025.
- [21] Zhang J R, Fan F, Zeng J W, et al. Prototype system for underwater wireless optical communications employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Optics Express, 2021, 29(22): 35570-35578.
- [22] Bolduc E, Bent N, Santamato E, et al. Exact solution to simultaneous intensity and phase encryption with a single phase-only hologram[J]. Optics Letters, 2013, 38(18): 3546-3549.
- [23] 马文琪, 路慧敏, 王建萍, 等. 基于空间光调制器和深度学习的涡旋光束产生[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1107001.
- Ma W Q, Lu H M, Wang J P, et al. Vortex beam generation based on spatial light modulator and deep learning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1107001.
- [24] 史晨寅, 韦宏艳, 贾鹏, 等. 基于机器学习检测相位畸变后的涡旋光束轨道角动量[J]. 光子学报, 2022, 51(1): 0151123.
- Shi C Y, Wei H Y, Jia P, et al. Detect the orbital angular momentum of vortex beams after phase distortion based on machine learning[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(1): 0151123.
- [25] Xiao Y, Liu H D, Song Y W, et al. Accurately quantifying the superposition state of two different Laguerre-Gaussian modes with single intensity distribution measurement[J]. Quantum Information Processing, 2022, 21(3): 90.
- [26] Nielsen M A, Chuang I L. Quantum computation and quantum information[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [27] Pratt V. Direct least-squares fitting of algebraic surfaces [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 145-152.
- [28] Jerlov N G. Marine optics[M]. Amsterdam: Elsevier, 1976.
- [29] Zhao Y F, Xu J, Wang A D, et al. Demonstration of data-carrying orbital angular momentum-based underwater wireless optical multicasting link[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28743-28751.