

## 水下轨道角动量光通信

王健<sup>1,2\*</sup>, 王仲阳<sup>1,2</sup><sup>1</sup>华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;<sup>2</sup>湖北光谷实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 回顾了水下轨道角动量(OAM)模式光通信的研究进展,简要介绍了OAM模式的原理和产生、测量方法,全面综述了水下OAM模式的多种光通信方式(编码、复用、广播)以及涉及空水界面的光通信和快速自动对准辅助的光通信,同时介绍了水下其他结构光通信和基于OAM模式的复杂介质光通信。讨论了该领域的未来发展趋势。作为一种空间结构光场,将OAM模式引入水下光通信可开发空间新维度资源,为光通信可持续扩容提供新途径,提高无线光通信在水下短距互连的优势;OAM模式与水下传统通信方式及水下感知技术相结合,有望更好地满足未来高速海洋环境通信和高效海洋资源开发的发展需求。

**关键词** 光通信; 水下无线光通信; 轨道角动量; 结构光; 空间维度; 光场调控

中图分类号 O438.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231614

## 1 引言

全球气候变化及陆地资源日益枯竭使得对海洋的研究和开发已成为大势所趋,其中围绕水下无线通信(UWC)系统的研究受到了重要关注。水下无线通信指的是通过使用无线载波在水下环境中进行数据的传输,其中无线载波可以是声波、电磁波(如低频射频波)、光波等<sup>[1]</sup>。声波传播速度较慢、频率较低的特点使得高速、低延迟的数据传输难以实现,电磁波(如低频射频波)在水下的传输需要使用复杂设备,导致灵活性低和传输距离短等问题,难以得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>。水下无线光通信(UWOC)采用光波作为数据信息传输载体,相较于使用声波与射频波进行水下通信,具有更大的带宽、更好的抗干扰能力和更好的保密性能等优点<sup>[5]</sup>,近年来逐渐成为水下无线通信的研究热点。

水下无线光通信也面临很多问题,携带数据信息的光波会受到水下复杂介质环境(如海洋环境)中湍流、盐度、温度、浊度、海底障碍物等因素的影响,从而导致信号的衰落和传输质量的下降<sup>[6-7]</sup>。同时,海水中存在着大量的溶解物质和悬浮体,在不同的海域、水深以及季节等情况下的海水特性不同,从而导致光波在传输过程中发生脉冲的衰减和展宽,并产生误码,最终影响传输数据的正确性和传输距离<sup>[8]</sup>,这种传输介质称为海水信道,其特性与大气、光纤信道不同,对于不同波长光波的衰减也不同。为了在更大衰减长度的海

水信道中实现更大容量的通信,光源和调制方式的选择是影响水下无线光通信系统性能的重要因素。除此之外,也可以考虑选择光波的空间结构。目前的水下无线光通信系统主要使用的是高斯光,其具有近似均匀的场分布(束腰位置)。实际上,通过剪裁光波的空间结构可以得到具有非均匀场分布的结构光,如空间变化的幅度、相位、偏振分布等,其相比于高斯光开发了光波空间新维度资源,因此为提升光通信(包括水下光通信)的容量和丰富通信形式提供了新思路。

在多样化结构光中,携带轨道角动量(OAM)的涡旋光是一种光强呈圆环形分布的特殊结构光,其波前呈螺旋状,中心为相位奇点,中心光强为零<sup>[9]</sup>。涡旋光独特的空间幅度和相位结构使其在光学操控、显微成像、传感测量、量子科学等众多领域获得了广泛应用<sup>[10]</sup>。特别地,不同于圆偏振光携带的自旋角动量(SAM)仅有两个取值,涡旋光携带的OAM理论上可以为任意整数取值,且相互之间具有正交性。与光波波长维度的多值性和正交性类似,利用光波空间维度的OAM模式也可以携带信息并应用于光通信中<sup>[11-12]</sup>。目前OAM模式已被应用于自由空间光通信<sup>[13]</sup>、光纤通信<sup>[14]</sup>、片上光互连<sup>[15]</sup>。与此同时,OAM模式也可以应用于水下无线光通信中。例如:在2.96 m的水下信道中,利用螺旋相位板产生和检测涡旋光,在单路激光器直接调制频率为1.5 GHz的情况下,通过两路OAM模式的复用实现了3 Gbit/s的数据传输<sup>[16]</sup>;利用空间

收稿日期: 2023-10-06; 修回日期: 2023-12-28; 录用日期: 2024-01-05; 网络首发日期: 2024-01-15

基金项目: 国家杰出青年科学基金(62125503)、湖北省自然科学基金创新群体(2023AFA028)

通信作者: \*jwang@hust.edu.cn

光调制器(SLM)产生和探测涡旋光,在 1.2 m 水槽中通过 4 路 OAM 模式复用和 10 GHz 的激光器直接调制,实现了 40 Gbit/s 的数据传输<sup>[17]</sup>。这些实验验证了使用 OAM 模式可以在现有水下光通信技术基础上进一步提升通信容量。近年来,在水下无线光通信中使用 OAM 模式及其拓展的结构光正在受到越来越多的关注。

本文聚焦基于 OAM 模式的水下无线光通信技术。在简要介绍水下无线通信系统的基本概念和不同种类的水下无线通信技术(水下声波、电磁波和光波通信)后,重点对基于 OAM 模式的水下无线光通信技术进行了详细阐述,系统回顾了各种水下 OAM 模式光通信的实验进展,同时也介绍了水下其他结构光通信和复杂介质 OAM 模式光通信。最后,简要讨论了水下 OAM 模式光通信的未来发展趋势,并对其应用前景进行了展望。

## 2 水下无线通信

水下无线通信技术是指不需要借助光纤等传输介质,使用声波、电磁波(如低频射频波)和光波等无线载波在水中传输数据。其中,水下声波通信(UAC)被视为几十千米量级长距离通信最实用的方式<sup>[18]</sup>,是水下长距离高延迟定位中最常用的通信手段,其最早的使用可以追溯到 15 世纪达·芬奇使用声波来估计船只的距离。电磁波(如低频射频波)通信可以追溯到 19 世纪无线电在军事上用莫斯码通信,电磁波在陆地和水下的传播有较大差异,陆地通信中电磁波传播相对容易控制,水下环境复杂多变且海水中电磁波衰减

严重,主要可进行水下短距离通信,其速率通常高于水声通信。不过,水声通信和电磁波通信都存在着有限带宽和数据传输速率的问题,因此,水下无线光通信作为有效的替代方案正在受到广泛关注,其高速和低延时特性可以满足日益增长的水下通信容量和带宽需求。下面将从各自的发展历程和优缺点等方面对这三种水下通信方式进行介绍。

### 2.1 水下声波通信

由于具有长距离通信的优势,水下声波通信在过去成为了最常用的水下通信方式<sup>[19-39]</sup>,其发展历程被简单汇总在图 1 中。1982 年,Quazi 等<sup>[19]</sup>利用单边带压缩载波振幅调制技术创造了第一个水下声学链接装置,其频带范围在 8~15 kHz 之间,通信质量比较差。1995 年,Zielinski 等<sup>[21]</sup>在 20 m 水深处实现了 13 km 范围内 8 kbit/s 的数据传输。1996 年,Stojanovic<sup>[37]</sup>提出了一个传输速率达到 40 kbit/s 的水下声波通信系统。2005 年,Ochi 等<sup>[22]</sup>使用 32-QAM 格式实现了 125 kbit/s 的传输速率。2020 年,Esmail 等<sup>[23]</sup>使用一种新的传输原理 TR-NOMA 来减小水下声学通道的时间和频率色散。2021 年,Qasem 等<sup>[24]</sup>提出了一种 DL-CIM-SS 原理,在提升能量利用效率和降低误码率的情况下提高水下声波通信的传输速率。水下声波通信虽然有较大的传输距离(数十 km),是常用的水下通信方式,但是也存在一些限制,比如载波频率较低引起的带宽受限、数据传输速率较低<sup>[40]</sup>;声波在水中的传播速度较低,导致时延较大;声学收发器较为笨重,能耗高且价格昂贵<sup>[41]</sup>,同时对海洋中的生物如哺乳动物和鱼类也有危害性<sup>[42]</sup>。

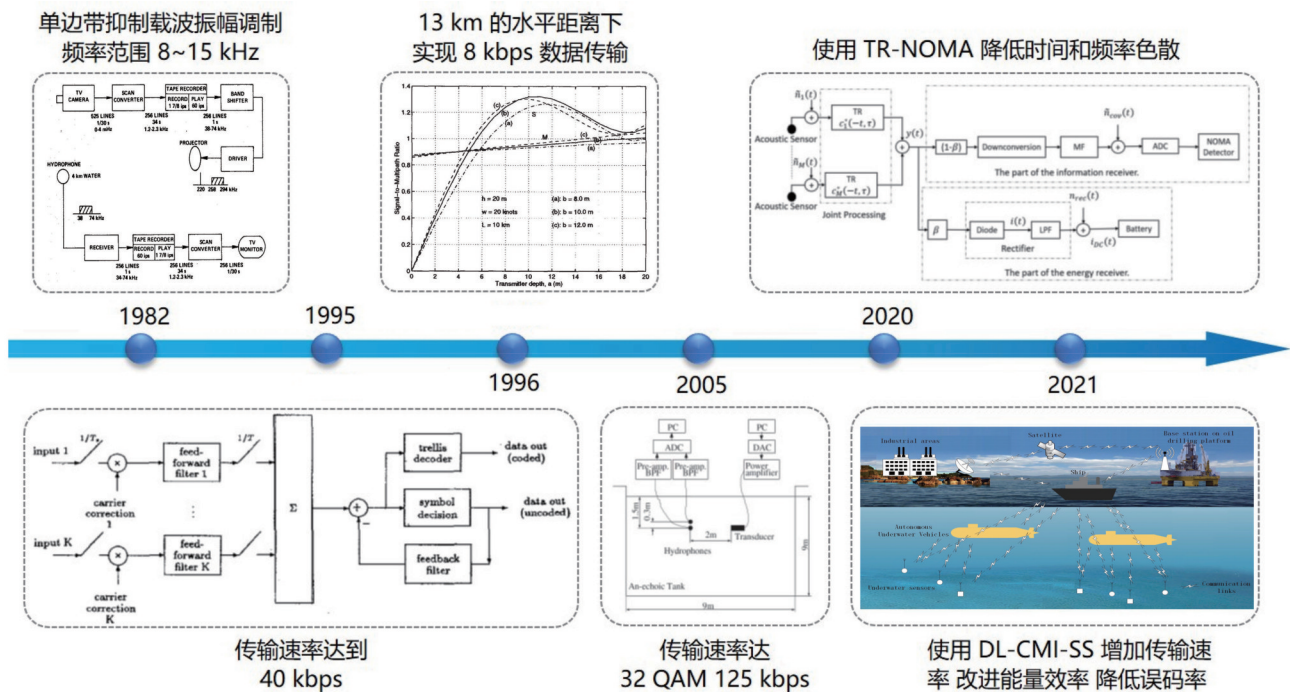


图 1 水下声波通信的发展历程<sup>[19-24]</sup>

Fig. 1 Development history of underwater acoustic communication<sup>[19-24]</sup>



## 2.2 水下电磁波通信

水下声波通信的数据传输速率受限且时延较大,水下电磁波通信<sup>[43-59]</sup>作为另一种水下通信方案被提出,其发展历程简要汇总在图 2 中。1967 年,Moore<sup>[43]</sup>提出一个基于微波的无线传输系统,在海面上实现了数十 km 的数据传输。2004 年,Al-Shamma'a 等<sup>[2]</sup>提出了一种基于微波的水下无线传输系统,在传输能量为 100 W 的情况下实现了 85 m 距离的数据传输。2006 年,Shaw 等<sup>[44]</sup>使用类似的方法在 90 m 的距离内实现了 500 kbit/s 的数据传输。2009 年,Urbe 等<sup>[45]</sup>在传输距离为 100 m

的条件下将传输速率提升到 10 MHz。2012 年,Lloret 等<sup>[46]</sup>在 2.4 GHz ISM 频段使用 BPSK、QPSK、CCK 等多种调制格式,在 16~17 cm 的范围内实现 11 Mbit/s 的传输速率。2019 年,Ryecroft 等<sup>[47]</sup>使用 433 MHz 的射频频段,在 7 m 距离下实现了 1.2 kbit/s 的数据传输,在 5 m 的距离下实现了 25 kbit/s 的数据传输。然而,高频波段的射频在水中的损耗较大,这限制了射频通信的距离,只能在较短距离范围内实现 Mbit/s 的数据传输<sup>[60]</sup>。同时,为了补偿传输过程中的损失,射频传输的天线较大,传输功率较高<sup>[25]</sup>。

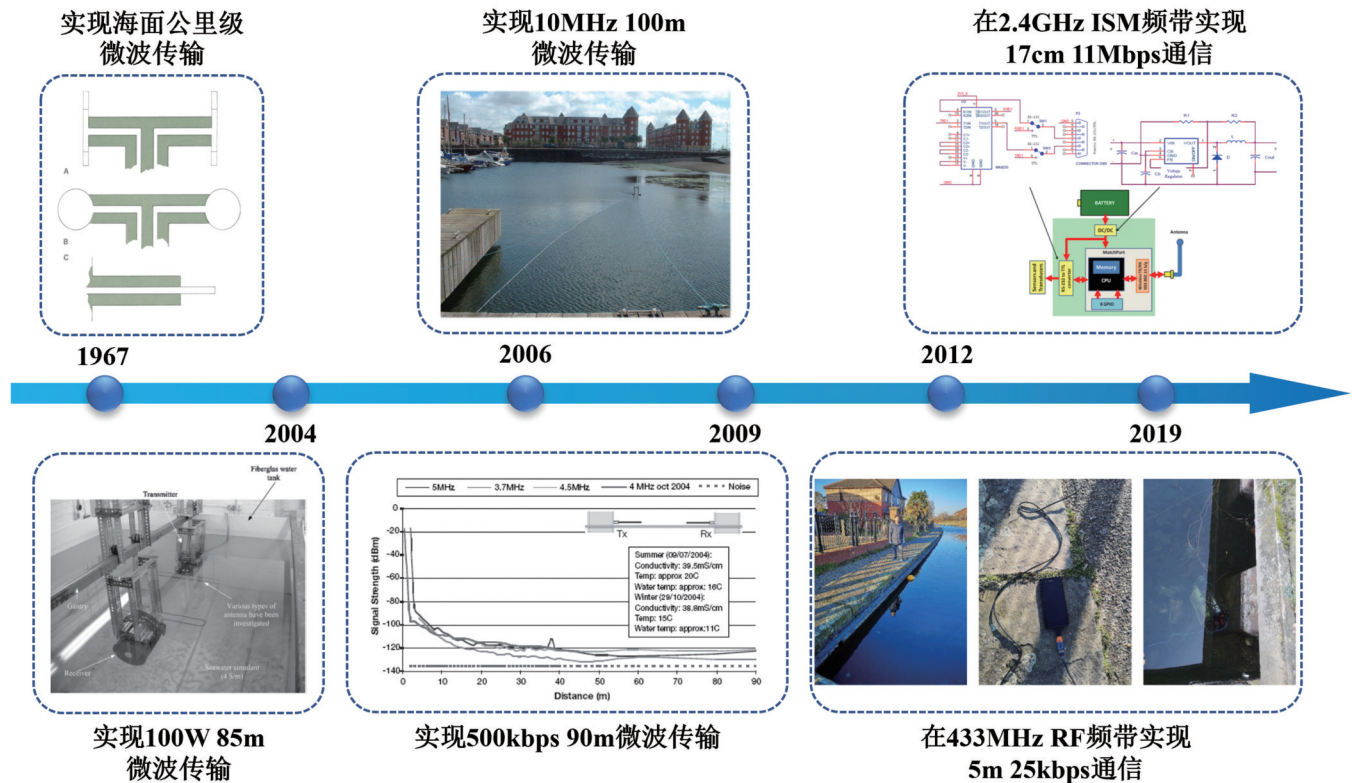


图 2 水下电磁波通信的发展历程<sup>[2, 43-47]</sup>

Fig. 2 Development history of underwater electromagnetic communication<sup>[2, 43-47]</sup>

## 2.3 水下光波通信

由于水下声波通信和水下电磁波通信都存在传输能量高、带宽小等问题,可以使用具有大带宽和低延时的光波在有限范围内进行水下无线光通信。用于水下无线光通信的光源主要包括蓝绿光发光二极管(LED)和激光二极管(LD)。水下无线光通信目前已经有很多研究工作<sup>[61-71]</sup>,图 3 给出其发展历程。1963 年,Duntley<sup>[61]</sup>发现 450~550 nm 蓝绿光波段在水中的损耗较小,指出了水下光通信的通信窗口。2008 年,Hanson 等<sup>[62]</sup>使用 532 nm 的 LD,将水下无线光通信的传输速率突破至超 Gbit/s 量级。2013 年,Cossu 等<sup>[63]</sup>使用 470 nm 的 LED 阵列在 2.5 m 传输距离内实现了速率为 58 Mbit/s 的传输。2015 年,Oubei 等<sup>[64]</sup>使用 16-QAM OFDM 格式在 5.4 m 范围内实现了速率为

4.8 Gbit/s 的传输。2018 年,Fei 等<sup>[65]</sup>使用 DFT 调制格式在 15 m 范围内实现了速率为 7.33 Gbit/s 的传输。2019 年,Wang 等<sup>[66]</sup>使用 32-QAM OFDM 格式和 MPPC 接收器在 21 m 范围内实现速率为 312.03 Mbit/s 的通信。2021 年,Du 等<sup>[67]</sup>使用 DFT-S DMT 调制格式在 50 m 范围内实现速率为 5 Gbit/s 的传播。2023 年,Du 等<sup>[68]</sup>使用 I-SC-FDM 格式和 SWI-DNN 均衡器在 90 m 距离下实现了速率为 660 Mbit/s 的传输。

除了图 3 所示的发展历程外,水下无线光通信在近几年发展迅速,取得了较大突破,表 1 详细地列举了近 10 年水下无线光通信的发展情况,可以看出水下无线光通信在传输距离和数据传输速率上取得的重要进展,多种频谱效率更高的调制格式也被提出和利用。

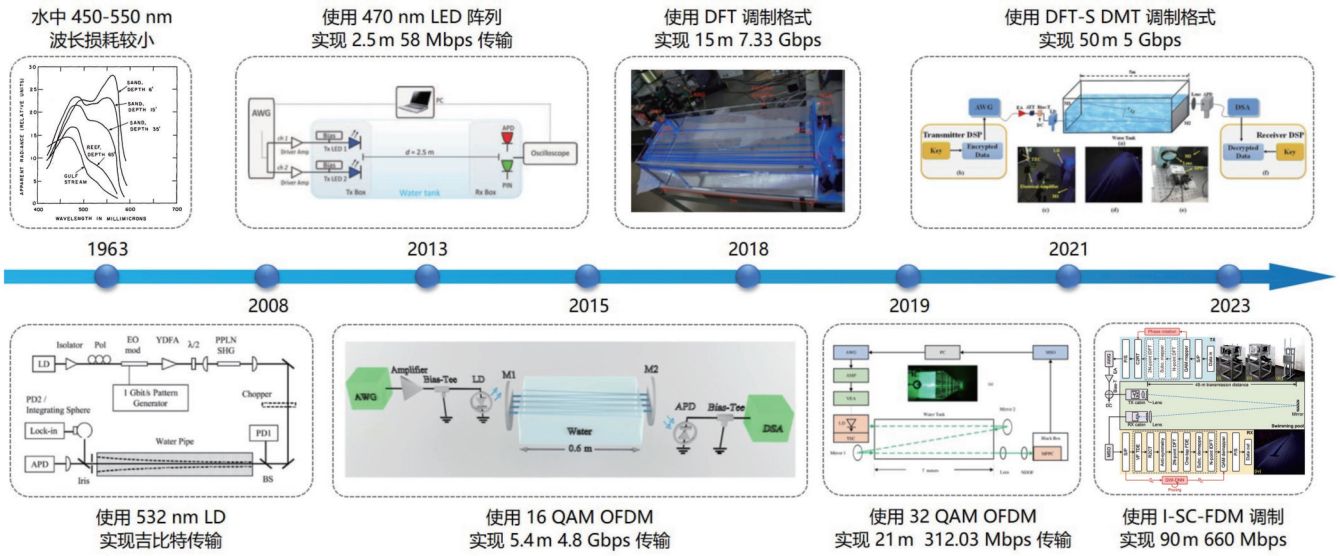


图 3 水下无线光通信的发展历程<sup>[25, 61-68]</sup>

Fig. 3 Development history of underwater wireless optical communication<sup>[25, 61-68]</sup>

从表 1 可以看出,水下无线光通信可以实现超 Gbit/s 量级的传输速率,传输距离超 100 m 的通信也得以实现。由于光波的传播速度快,水下无线光通信的时延非常小。同时,水下无线光通信使用收发器[如 LED、

LD 和光电探测器(PD)]等,与水下声波通信和水下电磁波通信相比功耗较低,成本也更具优势。表 2 对三种主要的水下无线通信技术进行了比较。

表 1 水下无线光通信近 10 年的发展情况

Table 1 Development of underwater wireless optical communication in past decade

Year	Source	Scheme	Date rate	Distance / m	Water type	Optical power	PD	Bit error rate (BER)	Ref. No
2013	470 nm LED	DMT	58 Mbit/s	2.5	Municipal water	10 W	APD	$<10^{-9}$	[63]
2014	421 nm LD	N/A	2.488 Gbit/s	1.7	Harbour water	30 mW	PIN	Error-free	[72]
2015	450 nm LD	1-QAM-OFDM	4.8 Gbit/s	5.4	N/A	15 mW	APD	$2.6 \times 10^{-3}$	[64]
2016	450 nm LD	16OAM-OFDM	3.2 Gbit/s	6.6	Tap water	15 mW	APD	$6.83 \times 10^{-4}$	[73]
2017	520 nm LD	OOK	2.7 Gbit/s	34.5	Tap water	19.4 mW	APD	$2 \times 10^{-6}$	[74]
2018	448 nm LED	NRZ-OOK	25 Mbit/s	10	Tap water	1 W	APD	$1 \times 10^{-4}$	[75]
2019	457 nm LED	128QAM-SGS	2.534 Gbit/s	1.2	N/A	N/A	PIN	$<3.8 \times 10^{-3}$	[76]
2019	457 nm LED	64QAM-DMT	3.075 Gbit/s	1.2	N/A	N/A	PIN	$<3.8 \times 10^{-3}$	[77]
2019	520 nm LD	NRZ-OOK	500 Mbit/s	100	Tap water	7.25 mW	APD	$2.5 \times 10^{-3}$	[78]
2019	450 nm LD	NRZ-OOK	2.5 Gbit/s	60	Tap water	50 mW	APD	$3.5 \times 10^{-3}$	[79]
2019	520 nm LD	32QAM-OFDM	312.03 Mbit/s	21	Tap water	$<15$ mW	MPPC	$<3.8 \times 10^{-3}$	[66]
2020	450 nm LD	NRZ-OOK	2 Mbit/s	117	Tap water	22.9 mW	SPAD	$5.31 \times 10^{-4}$	[80]
2020	450 nm LD	NRZ-OOK	500 bit/s	144	Tap water	22.9 mW	SPAD	$1.89 \times 10^{-3}$	[80]
2020	520 nm LD	32-QAM	3.31 Gbit/s	56	Tap water	17.8 mW	APD	$<3.8 \times 10^{-3}$	[81]
2021	450 nm laser	DFT-S DMT	5 Gbit/s	50	Coastal ocean	16.18 mW	APD	$<3.8 \times 10^{-3}$	[67]
2022	450 nm LD	OOK	3 Gbit/s	100.6	Coastal ocean	14.99 mW	PMT	$<3.8 \times 10^{-3}$	[82]
2023	450 nm LD	I-SC-FDM	660 Mbit/s	90	Pool	188.8 mW	PMT	$<3.8 \times 10^{-3}$	[68]

### 3 基于 OAM 模式的水下无线光通信

在过去几十年里,通过利用光波的波长、幅度、相位、时间、偏振等传统维度,水下无线光通信技术在提高通信容量方面取得了重要进展,不过随着这些传统

维度开发殆尽,进一步增加通信容量将面临严峻挑战。探索光波的空间新维度为进一步增加通信容量提供了一种重要解决途径。通过调控光波空间维度和剪裁光波空间结构可以得到结构光,其中包括具有螺旋相位波前携带 OAM 的涡旋光以及拓展的具有空间变化幅



表 2 三种水下无线通信技术的比较<sup>[25]</sup>  
Table 2 Comparison of three underwater wireless communication technologies<sup>[25]</sup>

Communication technology	Acoustic communication	RF communication	Optical communication
Range	km scale	10-100 m	100-200 m
Data rate	<10 kbit/s	<0.1 Gbit/s	<40 Gbit/s
Speed	1500 m/s	$2.25 \times 10^8$ m/s	$2.25 \times 10^8$ m/s
Frequency	10 Hz-1 MHz	MHz scale	$10^{12}$ - $10^{15}$ Hz
Bandwidth	kHz scale	MHz scale	MHz-GHz scale
Consumption	Low	High	Low
Cost	High	High	Low
Antenna size	0.1 m	0.5 m	0.1 m
Latency	High	Moderate	Low
Biohazard	Yes	No	No

度、相位、偏振分布的广义结构光。相比光波传统维度, OAM 模式开发了空间新维度。一方面, OAM 模式具有多值性和正交性特点, 即 OAM 可以有多个取值且两两相互正交, 可以像其他维度一样用于信息编

码和作为载波进行信息复用; 另一方面, OAM 模式空间维度与光波传统维度相互兼容, 即基于 OAM 模式的光通信技术可以与传统光通信技术有机融合。因此, 基于 OAM 模式的水下无线光通信技术可以在现有水下无线光通信技术基础上进一步进行通信容量扩容。

### 3.1 OAM 模式原理及产生测量方法

OAM 模式是一种具有螺旋相位波前的特殊结构光, 相比于高斯光(束腰位置为平面波前), 其空间相位结构被调控, 对应地也产生了被剪裁的空间幅度分布。OAM 模式具有  $\exp(i\ell\theta)$  螺旋相位因子, 其中  $\ell$  为拓扑电荷数或 OAM 阶数 ( $\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ),  $\theta$  为方位角, 每个光子携带的 OAM 为  $\ell\hbar$  ( $\hbar$  为约化普朗克常数)。OAM 模式的螺旋相位结构使得中心为相位奇点, 因此呈现出中心光场强度为零的环状光强分布, 其具有螺旋相位结构, 因而也被称为涡旋光, 图 4 所示为典型的 OAM 阶数的涡旋光(强度分布、相位分布、螺旋相位结构)。常见的携带 OAM 的光束有多种类型, 如拉盖尔-高斯光束、贝塞尔-高斯光束、完美涡旋光束等。

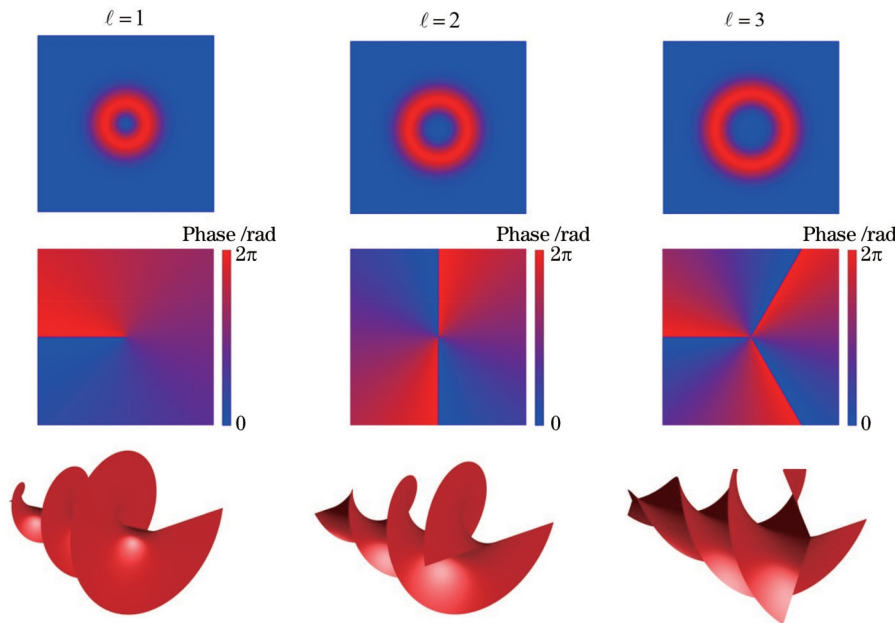


图 4 具有不同拓扑电荷的 OAM 模式特征(强度分布、相位分布和波前)

Fig. 4 Characteristics of OAM modes with different topological charges (intensity distribution, phase distribution, and wavefront)

OAM 模式的产生关键是要生成具有空间螺旋相位分布的光场, 产生方法包括有源与无源两种。有源方法主要利用激光腔直接输出 OAM 光束, 该方法具有良好的光束质量<sup>[83-84]</sup>; 无源方法可以利用衍射光学元件、变换光学方法、螺旋相位板、Q 板(Q-plate)、J 板(J-plate)、数字微反射镜(DMD)、空间光调制器(SLM)、光纤器件、光子集成器件、超材料、超表面等<sup>[85-93]</sup>, 无源方法的可控性强, 实现便捷, 方式多样。

产生 OAM 模式后, 可以利用不同的 OAM 模式进行编码通信, 也可以利用不同的 OAM 模式作为不同

的载波携带各自信息进行复用通信, 还可以利用不同的 OAM 模式进行一对多的广播通信。OAM 模式通信的接收端通常需要将 OAM 模式转换为常规具有平面相位波前的类高斯光束, 这种转换一方面可以与现有高斯光通信系统相兼容, 另一方面也是最直接的解调 OAM 模式的方法, 因为解调后的类高斯光束中心为亮斑, 易于从其他 OAM 模式中滤波出来。目前, 使用比较多的方法是利用具有相反拓扑电荷数( $-\ell$ )的螺旋相位板或者 SLM 移除待解调 OAM 模式的空间

螺旋相位因子  $\exp(i\ell\theta)$ , 这样即可实现待解调 OAM 模式到类高斯模式的转换和测量。在 OAM 模式复用通信中, 也可以利用可扩展的多通道 OAM 模式复用解复用器更加高效地实现 OAM 模式的产生、复用、解复用、检测。

### 3.2 基于 OAM 模式的水下无线光通信研究进展

在以往文献中, OAM 技术已被报道并广泛应用于自由空间、光纤、芯片等场景的大容量光通信和互连中<sup>[11-15, 94-98]</sup>。近年来, 基于 OAM 模式的水下蓝绿光通信也有实验报道<sup>[16-17]</sup>, OAM 技术拓展了空间维度, 其为水下无线光通信的发展提供了新思路。

表 3 列举了近年来基于 OAM 模式水下无线光通

信的相关研究成果<sup>[3, 16-17, 99-105]</sup>, 其中详细给出了不同实验所使用的光源类型、调制格式、传输距离、水下传输环境、OAM 阶数、传输衰减等参数以及实验所得到的最高传输速率和比特误码率。对于基于 OAM 模式的水下无线光通信系统, 表 3 所示的链路传输速率最高可达 40 Gbit/s<sup>[17]</sup>, 比特误码率最低可达  $5 \times 10^{-7}$ <sup>[17]</sup>, 使用的 OAM 模式数量最多可达 4 个<sup>[17, 99, 101]</sup>, 传输最长距离可达 55 m<sup>[102]</sup>, 实现了实时通信实验<sup>[103, 105]</sup>。总的来说, 基于 OAM 模式的水下无线光通信通过拓展光波空间维度, 可以有效提高系统传输容量, 具有潜在的发展空间。接下来将对基于 OAM 模式的水下无线光通信系统在各种场景下的应用进展进行详细介绍。

表 3 近年来基于 OAM 模式的水下无线光通信研究成果

Table 3 Summary of recent underwater wireless optical communication achievements using OAM modes

Year	Source	Scheme	Data rate	Distance	Water type	Topological charge	Attenuation / dB	BER	Ref. No
2016	445 nm LD	NRZ-OOK	3 Gbit/s	2.96 m	Turbid water	$\pm 8$	35	$2.073 \times 10^{-4}$	[16]
2016	532 nm LD	OOK	40 Gbit/s	1.2 m	Tap water	$\pm 3, \pm 1$	2.5	$5 \times 10^{-7}$	[17]
2017	450 nm LD	NRZ-OOK	12 Gbit/s	3 m	Deionized water	$\pm 8, \pm 4$	N/A	$2.06 \times 10^{-4}$	[99]
2017	520 nm LD	16-QAM	1.4 GBaud	2 m	Tap water	+3	5	$1 \times 10^{-3}$	[100]
2017	520 nm LD	8-QAM	1.5 GBaud	3 m	Tap water	$\pm 6, \pm 3$	5	$1 \times 10^{-3}$	[101]
2018	520 nm LD	16-QAM	1.08 Gbit/s	2 m	Tap water	+1, +3, +5	N/A	$1 \times 10^{-4}$	[3]
2020	532 nm LD	Twisted photons	N/A	55 m	N/A	-2, -3, +3	40	N/A	[102]
2021	520 nm LD	Real-time OOK	1.25 Gbit/s	6 m	Tap water	$\pm 3$	N/A	$1.5 \times 10^{-2}$	[103]
2022	520 nm LD	QPSK	4 Gbit/s	2 m	Tap water	$\pm 3$	2	$3.8 \times 10^{-3}$	[104]
2023	488 nm LD	Real-time OOK	20 Mbit/s	9 m	N/A	$\pm 3$	37	$1.26 \times 10^{-3}$	[105]

#### 3.2.1 水下 OAM 模式编译码通信

传统的 OOK、BPSK、QPSK、QAM 等调制格式信号可以看成是利用光波的幅度和相位维度(复振幅维度)进行编译码, 类似地, 也可以利用光波的空间维度进行编译码。由于 OAM 模式的拓扑电荷数理论上可以取值无穷, 利用不同 OAM 模式直接进行数据信息编译码为提高通信容量提供了一种有效解决方案。

利用光波多种 OAM 模式实现水下 OAM 模式编译码通信已有研究报道。2017 年, Wang 等<sup>[106]</sup>在多进制水下无线光通信系统中采用拉盖尔-高斯光束和轨道角动量移位键控(OAMSK)调制, 研究了弱海洋湍流通道, 分别推导了基于 OAMSK 调制的水下无线光通信系统的符号误码率和信道容量的解析表达式, 并使用最佳模式间隔详细分析了该多进制水下无线光通信系统在不同弱湍流条件下的符号误码率性能和通道容量。图 5(a)所示为使用四元 OAMSK 调制/解调的水下无线光通信系统的工作原理。每个四元符号对应于一个拓扑电荷数为  $m$  的 OAM 模式(如  $00 \rightarrow m_1, 01 \rightarrow m_2, 10 \rightarrow m_3, 11 \rightarrow m_4$ )。在发射端, 在一个符号周期  $T$  内, OAM 模式为  $m=0$  的光束(高斯光束)被 OAM 模式选择模块选择性地发射到一个可编程的 SLM 上。

经 SLM 的调制后, 携带 2 bit 信息的时变光束通过湍流的水下无线光通信信道发送到接收器, 传输过程中将受到海洋湍流的干扰。在接收端, 一个 OAM 模式  $m_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 将被解调, 并通过在 SLM 中引入相反的螺旋相位全息图将  $-m_i$  转换成 0。经解调后, OAM 模式为 0 的有效光束和干扰光束将被探测和采样。具有最大采样值的符号可以由判决装置确定为原始发射符号。因此, 原始的四元符号可以被逐一恢复。图 5(b)显示了有效信号能量随 OAM 模式  $m$  的变化, 可以看出, 随着  $m$  的增加, 在三种弱湍流条件下, 有效能量的值会降低。图 5(c)给出了基于 OAMSK 调制的水下无线光通信系统的信道容量与信噪比的关系。可以看出, 随着信噪比的增加, 信道容量起初近似呈线性增加, 然后达到饱和状态, 这证实了所提出信道容量模型的正确性。

2018 年, Cui 等<sup>[107]</sup>研究了一个使用卷积神经网络(CNN)的 UOC-OAM-SK 解码器, 模拟了 8 种叠加的拉盖尔-高斯(LG)光束作为三进制 OAM-SK 编码器, 并模拟了光波在海洋中的传输。图 6(a)给出了 UOC-OAM-SK 系统示意图, 用户信息在计算机中被编码, 并在 SLM 中按照密码本的要求转变成图样。LG 光束的  $n$  种叠加被用来编码, 代表的是每个图案的  $\log_2 n$  比



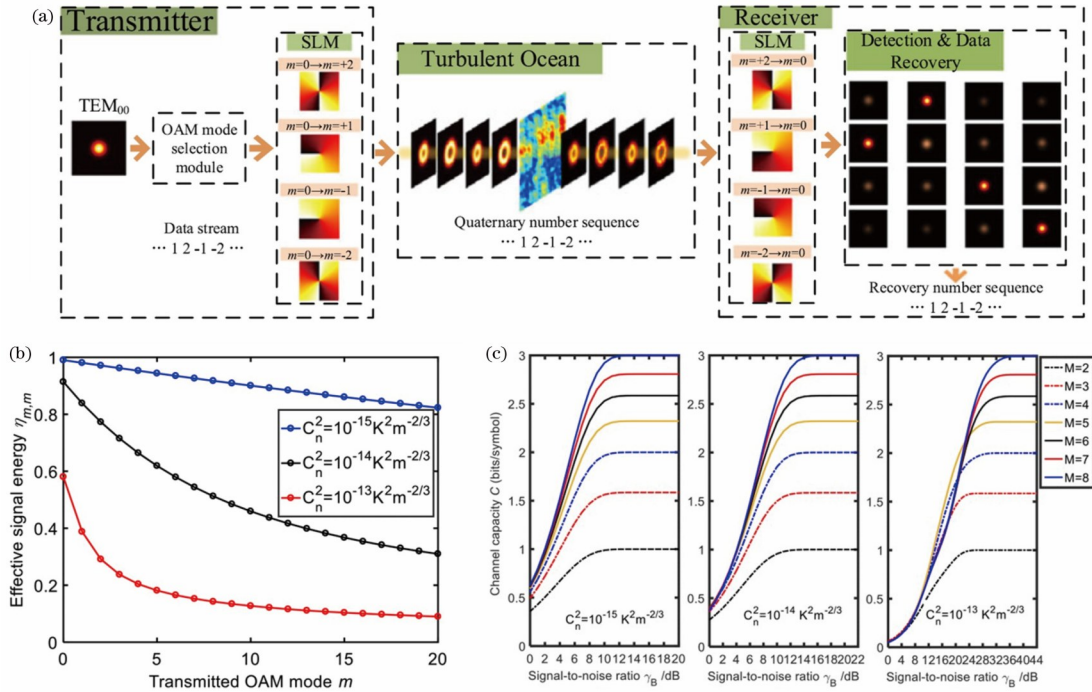


图 5 多进制 OAMSK 调制的海洋湍流水下无线光通信系统<sup>[106]</sup>。(a) 四进制 OAMSK 调制的水下无线光通信系统；(b) 弱海洋湍流下有效信号能量与传输 OAM 模式的关系；(c) 信道容量与信噪比的关系

Fig. 5 Underwater wireless optical communication system using multi-ary OAMSK modulation over ocean turbulence<sup>[106]</sup>. (a) Quaternary OAMSK modulation-based underwater wireless optical communication system; (b) effective signal energy versus transmitted OAM mode under weak ocean turbulence; (c) channel capacity versus signal-to-noise ratio

特。来自船舶或潜艇的传输光束在海洋湍流通道中传播,然后被一个电荷耦合器件(CCD)接收器捕获。捕获的光束强度模式被传输到计算机进行解码。图 6 (b)显示了在  $C_n^2$  由温度主导的情况下,使用 CNN 和共轭模式排序的解码器准确率与距离的关系曲线。对于共轭模式排序方法,实验重复该程序 5000 次以计算平均准确率。共轭模式排序方法在弱湍流下表现良好,但当湍流变强时,其性能迅速劣化。此外,CNN 在所有情况下都表现出近 100% 的高准确率,而且训练数据库的准确率略高于测试数据库。结果表明,使用 CNN 的解码器在海洋湍流下的表现优于传统的共轭模式排序方法。图 6(c) 显示了不同训练集训练的 CNN 确定未知湍流水平的能力。仿真结果显示,使用 CNN 的解码器在几十 m 的距离内或在弱到中等的湍流下表现出优异的性能,解码器具有很高的准确度(接近 100%),在弱-中度湍流下,80 m 内的准确度高于 95%。

2019 年,Cui 等<sup>[108]</sup>通过实验证明了基于 CNN 的 16 进制 OAMSK 解码器在水下无线光通信系统中的性能。该实验在一个充满流动咸水的 1 m 水箱中验证了 OAMSK 系统的解码准确率。海洋湍流通过 SLM 随机相位屏来模拟。图 7(a) 给出了使用 CNN 解码器的 OAM 模式水下无线光通信系统的实验装置图。在发射端中,一束 532 nm 的高斯光由低噪声激光器产生,在通过一个扩展器后,光斑尺寸被扩展 10 倍。使

用计算机来控制 SLM,并将 MATLAB 上创建的图案发送到 SLM 上。在接收端,接收的光束经过透镜后被送到 CCD,以获取接收光束强度的图像。然后,这些图像被发送到计算机,用于训练和测试 CNN。图 7(b) 给出了解码器在浑浊的盐水中的测试结果。对于 A1 和 B 组,解码器在浊水中的精确度高于 99.50%。增加像素数会使 A1 和 B 组的解码准确率略有提高。图 7(c) 给出了解码器在不同强度的海洋湍流下的解码准确率,可以看出:当湍流较弱(T1)时,像素数为  $48 \times 48$  和  $64 \times 64$  的解码准确率可以超过 99.66%;当湍流变强时,解码准确率迅速下降。当湍流变强时,增加像素数可以在一定程度上提高准确率。

2023 年,Wang 等<sup>[109]</sup>提出了一种使用 CNN 图像识别器作为解调器的相干解调 UWOC-OAM-SK 系统。与非相干系统相比,在接收器处从 OAMSK 信号中解调出 OAM 模式之前,所提出的系统可以获得具有更高图像对比度和更多模式特征的检测图像,因此具有更高的可靠性。此外,该系统可以识别相互共轭的 OAM 模式,这可以大大节省 OAM 通信中的复用通道资源。图 8(a) 给出了使用 CNN 图像识别器作为解调器的相干解调 UWOC-OAM-SK 系统的原理图。在计算机中对信息进行编码,然后将每个编码对应的相位全息图加载到 SLM 上,同时,发射器处的激光器发射固定波长的高斯光束,经过偏振和准直后,经过 SLM 产生对应于 OAM 模式的 LG 光束。接收器产生一个

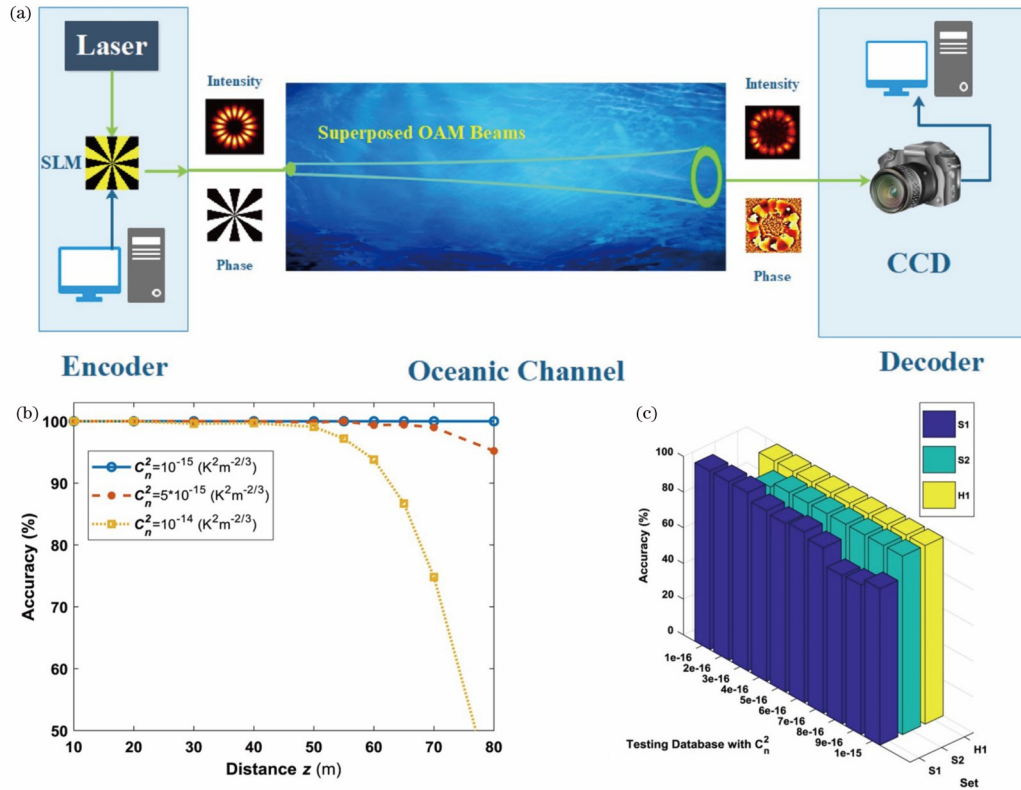


图6 海洋湍流通道下基于机器学习的自适应OAM移位键控解码器分析<sup>[107]</sup>。(a)系统示意图;(b)三种环境下准确率与传输距离的关系;(c)弱到中等湍流下的结果准确性

Fig. 6 Analysis of adaptive OAM shift keying decoder based on machine learning under oceanic turbulence channels<sup>[107]</sup>. (a) System schematic diagram; (b) accuracy varying with transmission distance under three different environments; (c) accuracy under weak-to-moderate turbulence

相同波长的基模高斯光束,其与LG光束在合束器(BC)中发生干涉,然后被CCD接收。获取的干涉光的光强图像传输到计算机中,通过CNN解调器,将光强图像分类为相应的代码,最后恢复传输的信息。图8(b)与(c)分别给出了传输60 m条件下和固定水质下传输解调的准确率。从图8(b)可以看出,使用CNN图像识别器作为解调器的相干解调UWOC-OAM-SK系统,在强湍流强度为 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}$ 的纯水中,系统的解调准确率高于97%。在图8(c)中,随着传输距离的增加,解调准确率的下降曲线明显比图8(b)中陡峭,这是因为:传输距离的增加导致涡旋光束的半径变大,从而使CCD获取的干涉光的强度图像也发生变化。

### 3.2.2 水下OAM模式复用通信

为了提高水下光通信的容量,另一个有效的方法是利用空间维度进行复用通信,即空分复用(SDM)技术。基于OAM模式的复用通信可以理解为SDM技术的一种,其利用不同的OAM模式作为不同信道的数据信息载波,类似波长维度的波分复用技术,由于不同OAM模式彼此正交,因此可以将携带不同信道数据信息的多个OAM模式进行复用以有效提高光通信系统的容量。

2016年,Baghdady等<sup>[16]</sup>使用两个445 nm的LD在2.96 m的距离上演示了一个水下无线光通信链路,并采用OAM模式来实现复用通信,完成了水下3 Gbit/s OOK-NRZ的信息传输。实验装置如图9(a)和(b)所示,包括两个复用通道,在每个通道上,使用任意波形发生器(AWG)生成一个32 bit伪随机OOK-NRZ调制信号。在每个LD通道引入一个螺旋相位板(准直后扩束前),以产生相应的OAM模式,实验中两个OAM模式具有相反的拓扑电荷数( $m = \pm 8$ )。接收器使用一个分束比为50:50的非偏振分束器,将输入的光束分成两路,并在每路放置一个相反的螺旋相位板以实现OAM模式的解调探测。图9(c)给出了两个OAM模式( $m = \pm 8$ )同时复用传输时通道1(上)和通道2(下)的眼图,实验也给出了每个通道在1 Gbit/s(左)和1.5 Gbit/s(右)传输速率下的眼图,传输环境为衰减系数 $c = 0.4128 \text{ m}^{-1}$ 的水下信道,平均误码率达 $2.073 \times 10^{-4}$ 。

2016年,Ren等<sup>[17]</sup>通过复用和传输4个绿光OAM模式,实现水下光通信传输链路容量高达40 Gbit/s。在实验中,系统研究了各种水下环境(例如散射、浊度、水流和热梯度)对光束质量和系统性能的影响,研究发现热梯度引起的光束质量劣化和失真最为严重(模式



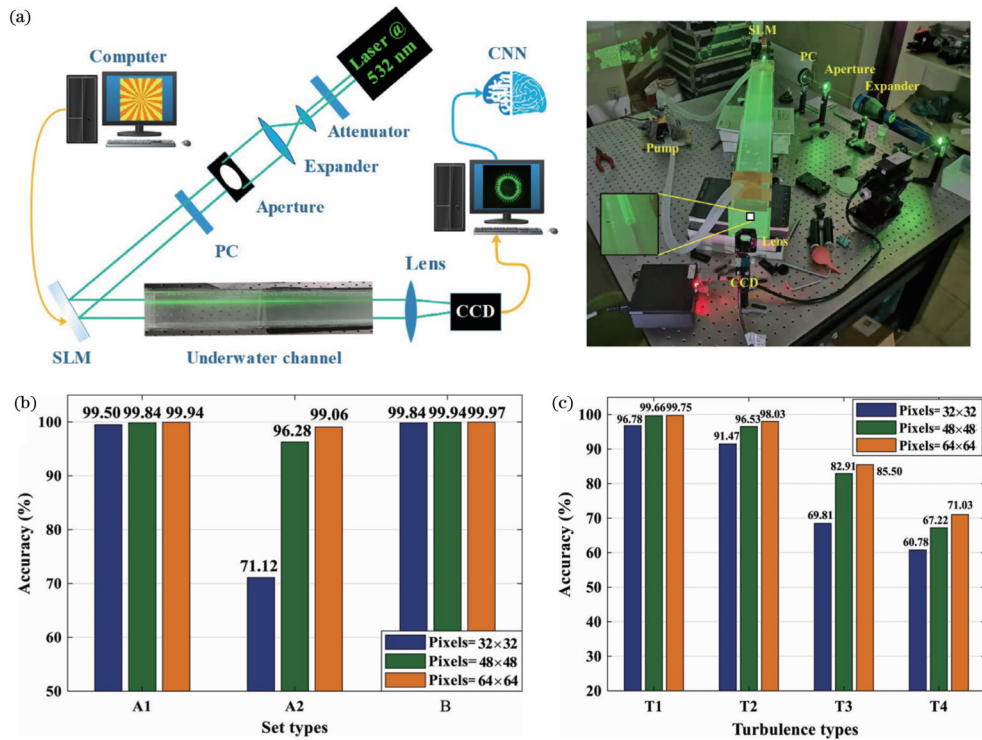


图7 基于机器学习的OAM移位键控解码器在水下信道中的实验研究<sup>[108]</sup>。(a)实验装置;(b)浑浊盐水下OAM解码准确率测试结果;(c)不同海洋湍流下OAM解码准确率测试结果

Fig. 7 Experimental study of machine-learning-based OAM shift keying decoders in underwater channels<sup>[108]</sup>. (a) Experimental setup; (b) testing results for OAM decoding accuracy in turbid salty water; (c) testing results for OAM decoding accuracy under different ocean turbulences

失真和光束漂移), 浊度引起的衰减最大。对于OAM模式复用通信的每个数据信道, 实验中给出了两种不同的数据产生方式: 一种是先通过红外光(1064 nm)调制产生10 Gbit/s信号, 再通过周期极化反转铌酸锂(PPLN)光波导倍频非线性效应得到绿光(532 nm)10 Gbit/s信号; 另一种是采用绿光直接调制1 Gbit/s信号。前者的优势是1064 nm红外波长目前有相对成熟的高速光调制器, 可以比较容易通过调制产生高速数据信号(如10 Gbit/s), 不过需要额外的非线性波长转换得到适合于水下光通信的绿光; 后者的优势是比较直接, 不过直接调制的速率相对较低(如1 Gbit/s)。实验中产生的绿光高斯光通过专门设计的集成电介质超表面相位板转化为携带数据信息的OAM模式。图10(a)为基于OAM模式复用实现高速水下光通信的应用场景。图10(b)为基于PPLN倍频生成信号的40 Gbit/s水下OAM模式复用通信的性能测试结果, 当其他所有OAM模式信道关闭和打开时, 图中给出了OAM模式信道 $\ell=+3$ (10 Gbit/s OOK信号)的眼图以及OAM模式信道 $\ell=+1, +3$ 的比特误码率曲线。从图中可以看出, 当所有OAM模式信道都打开时, 所有情况下的功率代价都小于2.2 dB, 这显示了良好的高速水下OAM模式复用通信性能。

2021年, Zhang等<sup>[103]</sup>提出并演示了一套高速、低

成本、紧凑型、便携式的集成封装OAM模式复用水下无线光通信原型系统。在实验中, 使用几何相位Q板器件和偏振分束器件来产生、复用、解复用和检测OAM模式。同时, 将信号生成、接收和处理功能集成到现场可编程门阵列(FPGA)中以实现高速、小体积和低功耗。将所有实验元器件封装到两个65 cm×35 cm×40 cm防水箱(带有透明窗口)中作为水下OAM模式复用光通信收发样机。利用该原型系统, 实验实现了1.25 Gbit/s水下6 m距离OAM模式复用通信( $\ell=+3$ 和 $\ell=-3$ 两个OAM模式信道, 每个信道速率为625 Mbit/s), 比特误码率性能低于 $1.5 \times 10^{-2}$ 阈值。图11(a)为OAM模式复用水下无线光通信概念和原理, 图11(b)为几何相位Q板产生OAM模式的概念和原理。图12(a)所示为OAM模式复用水下无线光通信原型系统实验装置图。发射机端为信号生成和调制组件。为了提高系统的集成度, 使用FPGA生成两个625 Mbit/s伪随机二进制序列(PRBS)信号, 然后通过小型可插拔收发光模块(SFP)对信号进行整形和放大, 并通过直接调制加载到两个520 nm单模尾纤LD上。实验中使用两个起偏器和半波片将两束光分别调制为 $x$ 和 $y$ 线偏振(LP)光。通过偏振分束器(PBS)合束后, 使用1/4波片将 $x$ 和 $y$ 线偏振光转换为正交圆偏振(CP)光, 然后通过一个几何相位Q板( $q=1.5$ )转换为复用OAM模式( $\ell=+3$ 和 $\ell=-3$ ), 通过

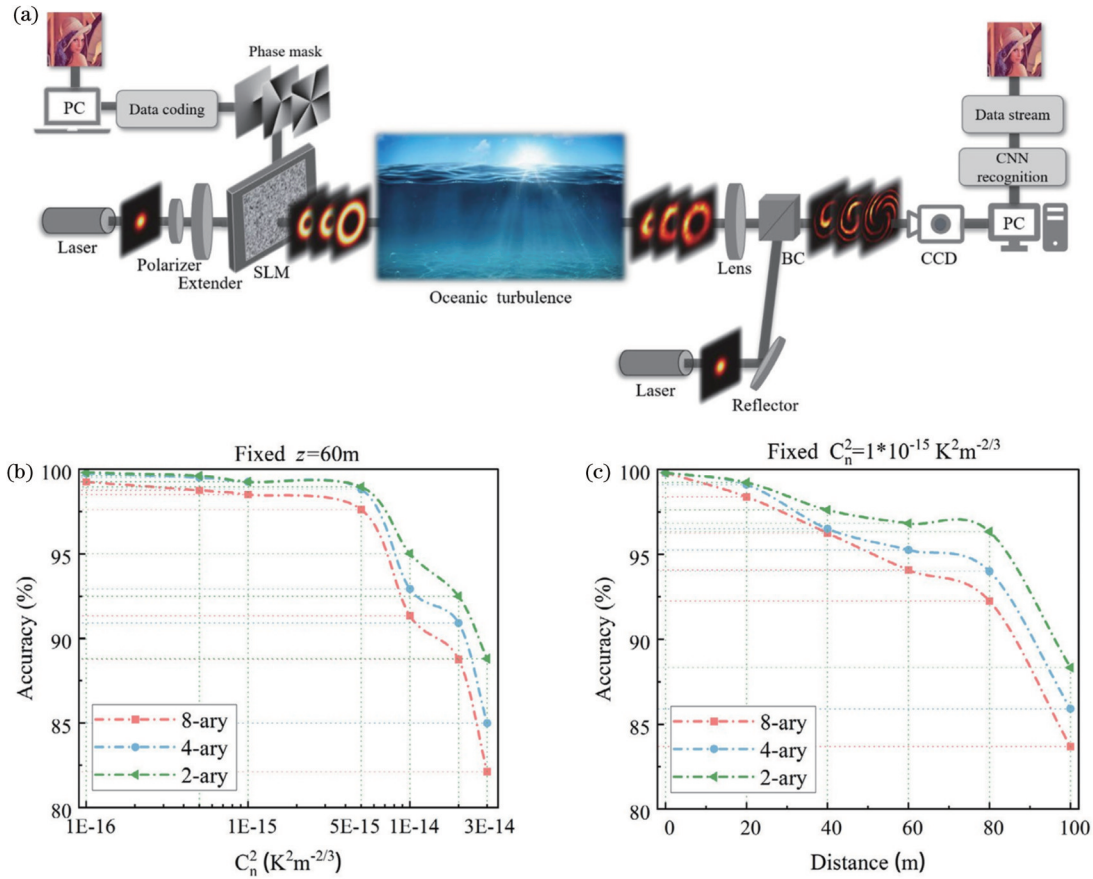


图 8 基于卷积神经网络的相干解调水下无线光通信系统<sup>[109]</sup>。(a)实验装置示意图；(b)传输 60 m 条件下的解调准确率；(c)固定水质下的传输解调准确率

Fig. 8 Coherent demodulated underwater wireless optical communication system based on convolutional neural network<sup>[109]</sup>. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) accuracy of demodulation over 60 m transmission distance; (c) transmission demodulation accuracy in fixed water

透镜调整光束尺寸后, OAM 模式进入水中传输。实验中使用了一个长度为 6 m 的水箱(40 cm×40 cm)。在接收机端, 使用透镜组合对经过水下复用传输后的 OAM 模式进行缩束, 使用中性密度滤光镜(NDF)调节接收光功率, 然后利用几何相位 Q 板解调 OAM 模式。经过 Q 板后, 复用的 OAM 模式被转换为正交圆偏振类高斯光束, 再经过 1/4 波片和半波片, 可以得到正交  $x$  和  $y$  线偏振光束, 进而被偏振分束器分离。利用两个高灵敏度雪崩光电探测器(APD)探测光信号。最后使用 FPGA 对探测信号进行处理。图 12 (b)为测试得到的基于 OAM 模式复用的水下无线光通信原型系统的模式信道串扰性能, 实验测得串扰约为 -14 dB。此外, 实验还测量了基于 OAM 模式复用的水下无线光通信原型系统的比特误码率性能, OAM 模式信道 1 ( $\ell=+3$ ) 和 OAM 模式信道 2 ( $\ell=-3$ ) 的比特误码率均低于  $1.5 \times 10^{-2}$  的阈值。

2023 年, Hei 等<sup>[105]</sup>采用单光子计数模块来接收光子信号, 实验通过建立符合实际系统的理论模型来分析误码率和光子计数统计, 并在单光子水平上解调 OAM 状态, 利用 FPGA 编程实现信号处理。基

于这些模块, 实验在 9 m 长的水路上建立了 2 个 OAM 模式复用的水下无线光通信链路。通过使用 OOK 调制和两脉冲位置调制, 在数据速率为 20 Mbit/s 时实现了  $1.26 \times 10^{-3}$  的误码率, 在数据速率为 10 Mbit/s 时实现了  $3.17 \times 10^{-4}$  的误码率, 低于  $3.8 \times 10^{-3}$  的前向纠错(FEC)阈值。图 13(a)为采用 2 个 OAM 模式复用的水下光子计数通信系统的实验装置。该系统采用了两路不同的 OAM 模式, 每一路都是通过使用单独的 SLM 对一个激光器发出的高斯光加载螺旋相位调制而产生。发射器上的 FPGA 板产生两个 10 MHz 电信号, 在经过比较器的波形整形和电压转换后, 作为两个 488 nm LD 的驱动信号。然后, 两路 OAM 模式通过分束器(BS)合束复用在一起, 经过水管同轴传输。为了模拟更大的信道损耗, 使用几个衰减器来调整传输的光功率。图 13(b)给出了光子计数统计直方图。图 13(c)给出了使用两种调制格式的实验系统的误码率性能。在发射功率为 0.5 mW 的情况下, 总的传输损耗为 37 dB, 从能量损耗的角度看, 相当于 283 m Jerlov I 型海水的衰减量。



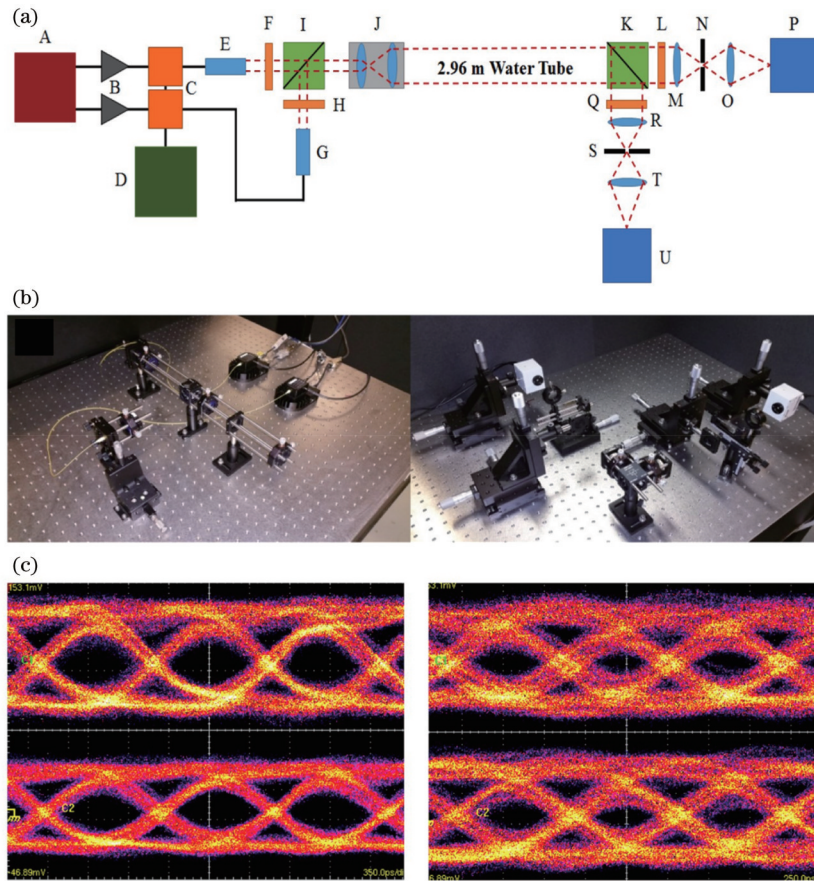


图9 水下OAM模式复用光通信链路<sup>[16]</sup>。(a)实验装置图；(b)发射机和接收机照片；(c)眼图

Fig. 9 Underwater OAM mode multiplexing optical communication link<sup>[16]</sup>. (a) Experimental setup; (b) photographs of transmitter and receiver; (c) eye diagrams

### 3.2.3 水下OAM模式广播通信

在OAM模式复用通信系统中,不同的OAM模式信道携带不同的数据信息,通过多通道复用提高通信容量。值得注意的是,在多样化的光通信系统网络中,也存在一些情况需要对一路信号进行多份复制并分发多个用户,这是一对多的通信,称为广播通信。OAM模式可以有很多取值,如果把信息同时加载到多个OAM模式上也实现了OAM模式广播通信。在自由空间光通信中,目前已经有基于OAM模式的广播通信报道<sup>[110-114]</sup>。在水下光通信中,广播通信也具有重要价值,如:在潜艇编队或其他多个水下交通工具之间共享传递数据信息的应用;中心站可以通过广播向多个无人航行器和传感器发送相同的指令,用于海洋环境监测等。水下OAM模式广播通信为这些应用场景提供了有效解决方案。

2017年,Zhao等<sup>[101]</sup>利用光波空间维度(空间相位结构),提出并演示了一种基于OAM模式的水下无线广播通信。实验实现了水下2 m距离广播传输4束绿光(520 nm)OAM模式(OAM<sub>-6</sub>、OAM<sub>-3</sub>、OAM<sub>+3</sub>、OAM<sub>+6</sub>),每个OAM模式通道携带1.5-Gbaud 8-QAM正交频分复用(OFDM)信号。基于OAM模式的水下无线广播通信的概念和原理如图14(a)所示。

在水下通信的情况下,有时需要向多个用户(如多个潜艇)发送多份复制的信号。考虑到具有螺旋相位结构的OAM模式可以有多个正交取值,可以将不同的OAM模式作为独特的标签分配给不同的用户。由高斯模式( $\ell=0$ )携带的种子信号被复制到多个OAM模式( $k, m, n \neq 0$ ),这可以通过一个复杂的相位图形来实现。携带相同数据信息的不同OAM模式分别被分配给不同的用户,即实现了基于OAM模式的水下无线光通信链路。图14(b)给出了基于OAM模式的水下无线广播通信的实验装置。1.5 GBaud的电信号由AWG产生,并采用 $m$ -QAM-OFDM高级调制格式。该信号由一个电放大器放大,然后加载到一个520 nm单模尾纤LD进行直接调制。LD的尾纤与准直器相连,这样,携带高级调制格式信号的基模高斯光就从光纤耦合到自由空间。输出的绿光入射到空间光调制器(SLM-1)上,该调制器加载有一个复杂的相位图形(分叉的广播相位图形)用于产生广播的多个OAM模式。在实验中,通过使用一个2 m长的长方形水箱来模拟水下条件,水箱中装满自来水。在经过2 m水下无线广播通信链路的传播后,接收到的广播OAM模式被另一个空间光调制器(SLM-2)解调,该空间光调制器为不同的广播OAM模式通道加载可切换的特定分叉

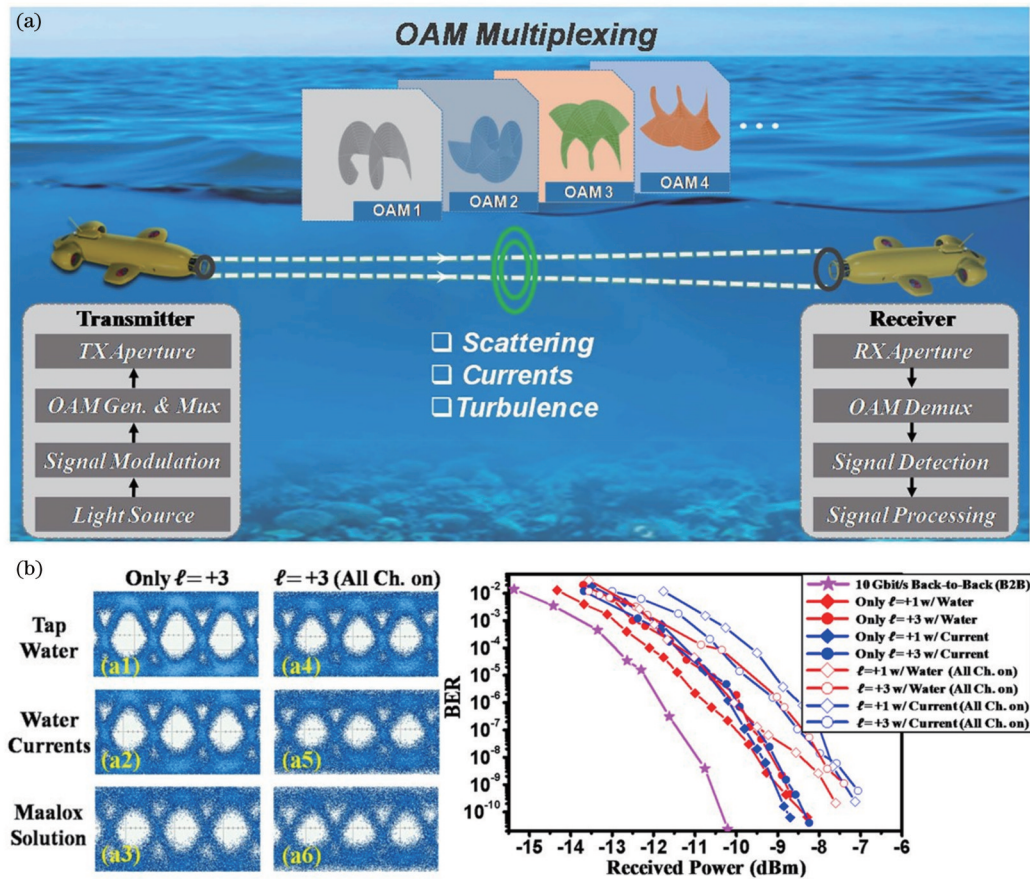


图 10 基于 OAM 模式复用的高速水下光通信<sup>[17]</sup>。(a) 水下 OAM 模式复用光通信应用场景；(b) 40 Gbit/s 水下 OAM 模式复用通信实验结果

Fig. 10 High-speed underwater optical communications using OAM mode multiplexing<sup>[17]</sup>. (a) Application scenario for underwater OAM mode multiplexing optical communication; (b) experimental results for 40-Gbit/s underwater OAM mode multiplexing communication

相位图形,其可以将需要解调的 OAM 模式转换为类高斯光并经过空间滤波进行有效分离和探测。检测后的信号经放大后被送到示波器进行比特误码率性能测量。实验中研究了 2 m 水下广播传输后的 OAM 谱性能。对于 1 对 4 的 OAM 广播通信(OAM<sub>-6</sub>, OAM<sub>-3</sub>, OAM<sub>+3</sub>, OAM<sub>+6</sub>),依次将不同阶次的分叉相位图形加载到 SLM-2 上以解调不同的 OAM 模式通道,图 15(a)所示为仿真和实验测量的解调归一化功率分布,即 OAM 谱,插图显示了广播 OAM 模式通道和未广播的 OAM 模式通道解调后的光强分布图。可以看出,对于广播的 OAM<sub>-6</sub>、OAM<sub>-3</sub>、OAM<sub>+3</sub>和 OAM<sub>+6</sub>通道,解调后的光强分布在中心均会出现一个亮点,而对于其他未广播的通道(如 OAM<sub>-9</sub>、OAM<sub>0</sub>、OAM<sub>+8</sub>),解调后的光强分布中心强度仍然为零。图 15(b)给出了 2 m 水下广播传输后多通道 OAM 模式携带信息的比特误码率性能。实验中将高斯光作为参考通道,对于不同的广播 OAM 模式通道(OAM<sub>-6</sub>、OAM<sub>-3</sub>、OAM<sub>+3</sub>、OAM<sub>+6</sub>),误码率曲线几乎相同,与参考通道相比,在前向纠错(FEC)阈值(误码率为  $1 \times 10^{-3}$ )时有约 2 dB 的代价,图 15(b)还给出了在 FEC 阈值以上和以下测

量的典型星座图。

### 3.3 涉空水界面的 OAM 模式光通信

除了连接不同水下用户间的水下无线光通信,跨空水界面的水下-水上用户之间、水下-水上-水下用户之间以及水下-空水界面-水下用户之间的光通信也有其潜在的重要应用场景,如空中/水下搜救、水下航行器和空中无人机间的通信、石油平台或船舶检查期间的数据传输、海洋环境传感检测数据的传输等。在一些实际应用中,在潮汐起伏的环境下确保准确的接收检测仍然是一个重要挑战,这也是跨空水界面光通信链路的常见情况。此外,某些障碍物如视距通信中的水下生物和固定的岩石也可能会阻挡光路,通过中间中继节点采用多跳传输<sup>[115-116]</sup>是解决这个问题的一个潜在方法,同时,利用水上中继的水下-水上-水下交互通信也可以绕开障碍物的影响。

2018 年, Wang 等<sup>[117]</sup>通过实验证明了一种使用 OAM 模式的自适应“水下-空气-水下”数据信息传输。在水下链路中采用离散多音频(DMT)调制信号,同时引入反馈机制实现灵活的“水下-空气-水下”光通信,速率达到 1.08 Gbit/s。通过比较两个相对水面高度



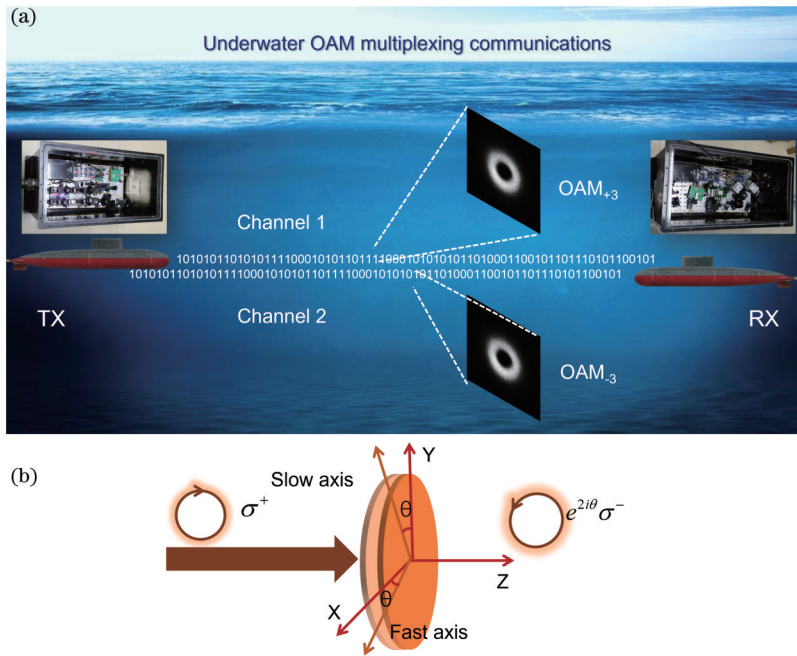


图 11 基于 OAM 模式复用的水下无线光通信原型系统<sup>[103]</sup>。(a) OAM 模式复用水下无线光通信概念和原理;(b)几何相位 Q 板产生 OAM 模式的概念和原理

Fig. 11 Prototype system of underwater wireless optical communication using OAM mode multiplexing<sup>[103]</sup>. (a) Concept and principle of underwater wireless optical communication using OAM mode multiplexing;(b) concept and principle of OAM mode generation by geometric phase Q-plate

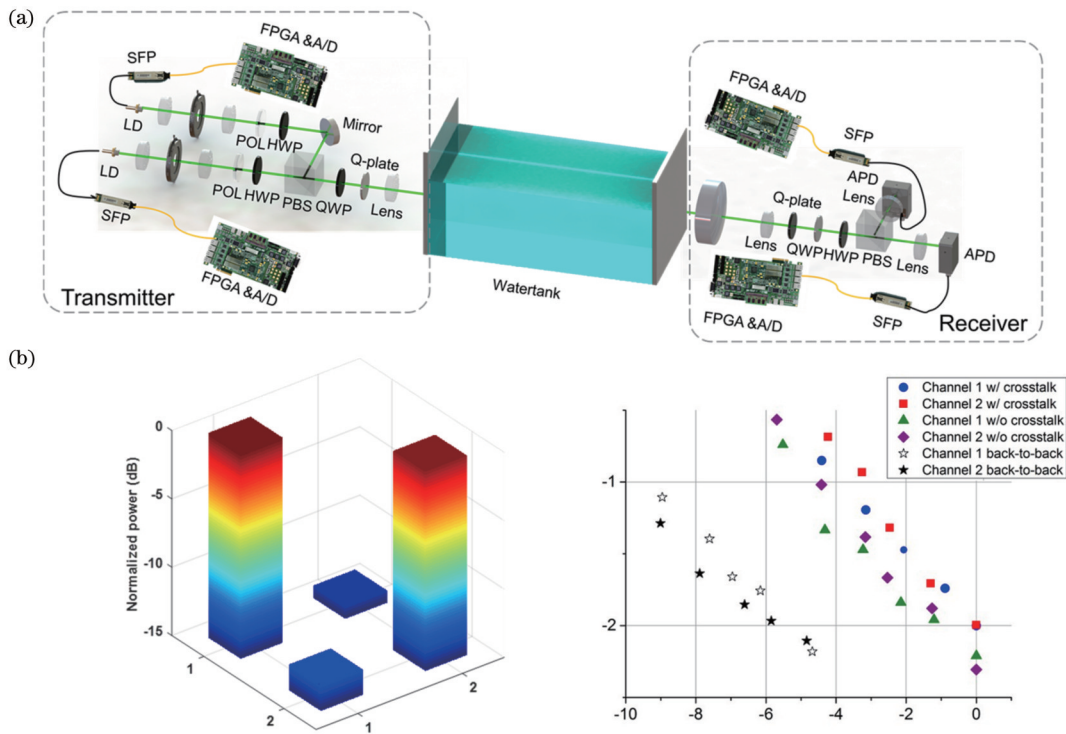


图 12 基于 OAM 模式复用的水下无线光通信原型系统实验装置图和实验结果<sup>[103]</sup>。(a) 实验装置;(b) 模式信道串扰矩阵及 BER 性能测试结果

Fig. 12 Experimental setup and results for prototype system of underwater wireless optical communication using OAM mode multiplexing<sup>[103]</sup>. (a) Experimental setup;(b) measured results of mode channel crosstalk matrix and BER performance

(25 mm 和 -10 mm)下有反馈和无反馈的系统性能,在相对水面高度为 25 mm 和 -10 mm 时,有反馈情况

下在 7% 开销硬判决前向纠错(HD-FEC)阈值( $3.8 \times 10^{-3}$ )下的功率代价分别提高了 2.5 dB 和 1 dB。图 16

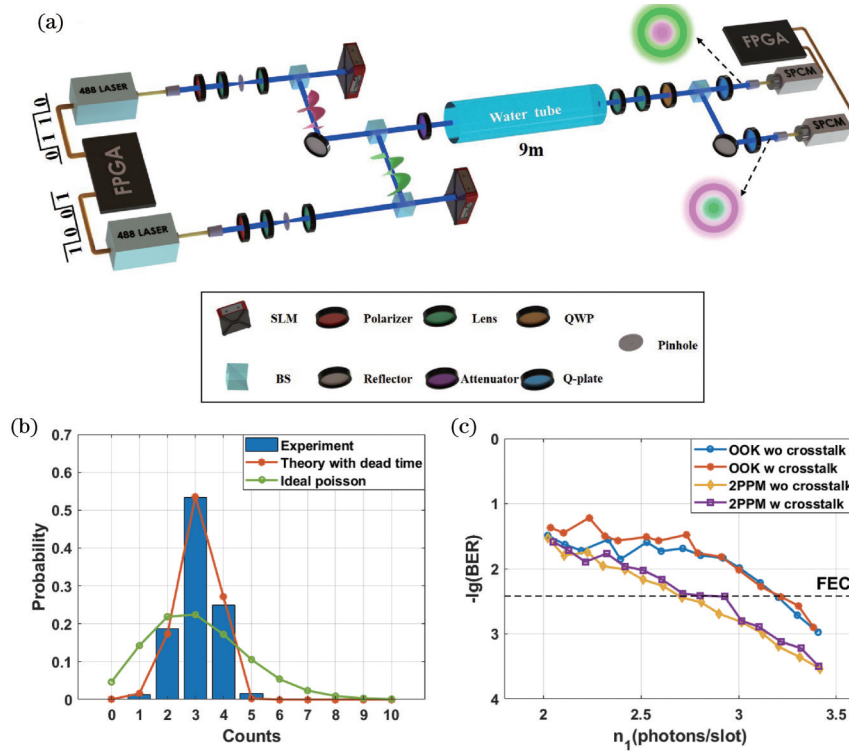


图 13 OAM 模式复用水下光子计数通信<sup>[105]</sup>。(a)实验装置图;(b)光子计数统计;(c) OAM 模式复用的误码率性能

Fig. 13 Photon-counting-based underwater wireless optical communication using OAM mode multiplexing<sup>[105]</sup>. (a) Experimental setup; (b) photon-counting statistics; (c) BER performance of OAM mode multiplexing

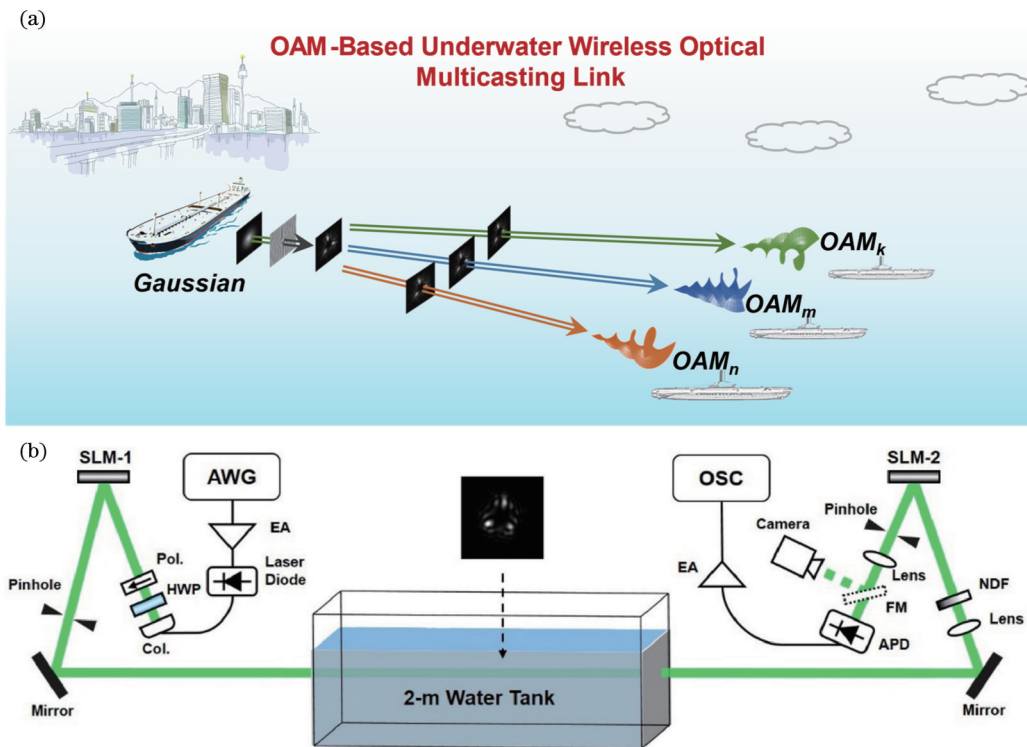


图 14 基于 OAM 模式的水下无线广播通信<sup>[101]</sup>。(a)概念及原理示意图;(b)实验装置图

Fig. 14 Underwater wireless broadcast communication using OAM modes<sup>[101]</sup>. (a) Concept and principle; (b) experimental setup

(a)为三种潜在的应用场景:一是空中用户和水下用户之间基于 OAM 模式的高速数据传输;二是空中用户和水下用户之间的协作通信,在这种情况下,空中用户

可以从一个水下用户接收数据信息,并向另一个水下用户发送指令;三是空中用户和水下用户之间的反射通信链路,从一个水下用户到达空中用户的光被反射



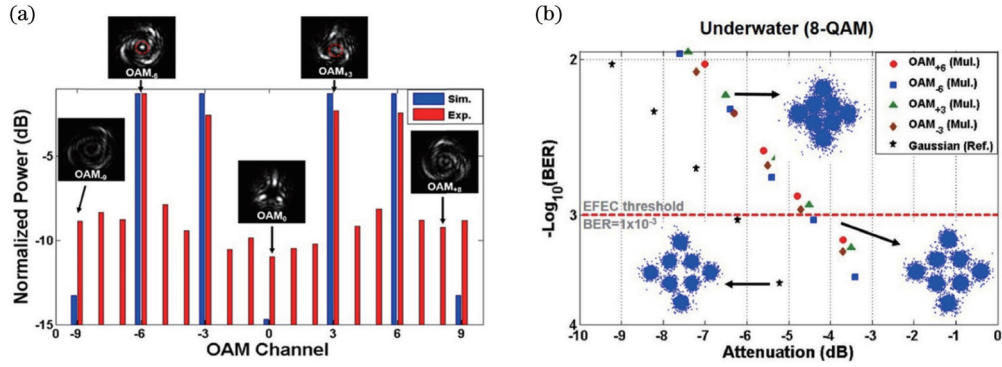


图 15 基于 OAM 模式的水下无线广播通信实验结果<sup>[101]</sup>。(a)基于 OAM 模式 1 对 4 广播通信的解调归一化功率分布(OAM 谱); (b)比特误码率性能

Fig. 15 Experimental results for underwater wireless broadcast communication using OAM modes<sup>[101]</sup>. (a) Demodulated normalized power distribution of OAM mode based 1-to-4 multicasting communication; (b) measured BER performance

回另一个水下用户,这可以绕过障碍物。图 16(b)示意了引入反馈控制机制的“水下-空气-水下”OAM 模式绿光通信的实验配置。在发射端,AWG 产生 DMT 电信号,AWG 的采样率设定为 800 MSa/s,总传输速率为 1.08 Gbit/s,在经过电放大器后,基带 DMT 信号被直接调制到 520 nm 单模尾纤 LD 上。然后,LD 的尾纤连接到一个准直器将携带数据信息的高斯光耦合到自由空间中,输出的绿光通过一个加载螺旋相位的空间光调制器(SLM-1)后其高斯光模式被转换为 OAM 模式。使用一个半波片和一个起偏器来调整光的偏振,使其与 SLM 的最佳工作偏振方向保持一致。在实验中,使用一个 2 m 长的矩形水箱(40 cm × 40 cm)并通过改变水箱中的水面高度来模

拟潮汐的起伏。在接收端,通过使用另一个空间光调制器(SLM-2)并加载相反的螺旋相位将传输后的 OAM 模式转换为类高斯模式,并进行检测。实验研究了潮汐的起伏对接收到的 OAM 模式质量和系统性能的影响。在发射端输入和接收端输出的高斯光、 $OAM_{+1}$ 、 $OAM_{+3}$ 和  $OAM_{+5}$ 模式及其解调光斑的强度分布如图 17(a)所示。当水位升高 25 mm 和降低 10 mm 时,图 17(a)也给出了有反馈和无反馈情况下的输出光斑的强度分布,图 17(b)给出了有反馈和无反馈情况下的误码率性能测量结果,图中也给出了典型的信号星座图。在无反馈情况下,潮汐引起的水面高度变化会导致接收光斑位置的显著改变,进而劣化通信性能。相比之下,引入反馈机制后可以稳定接收

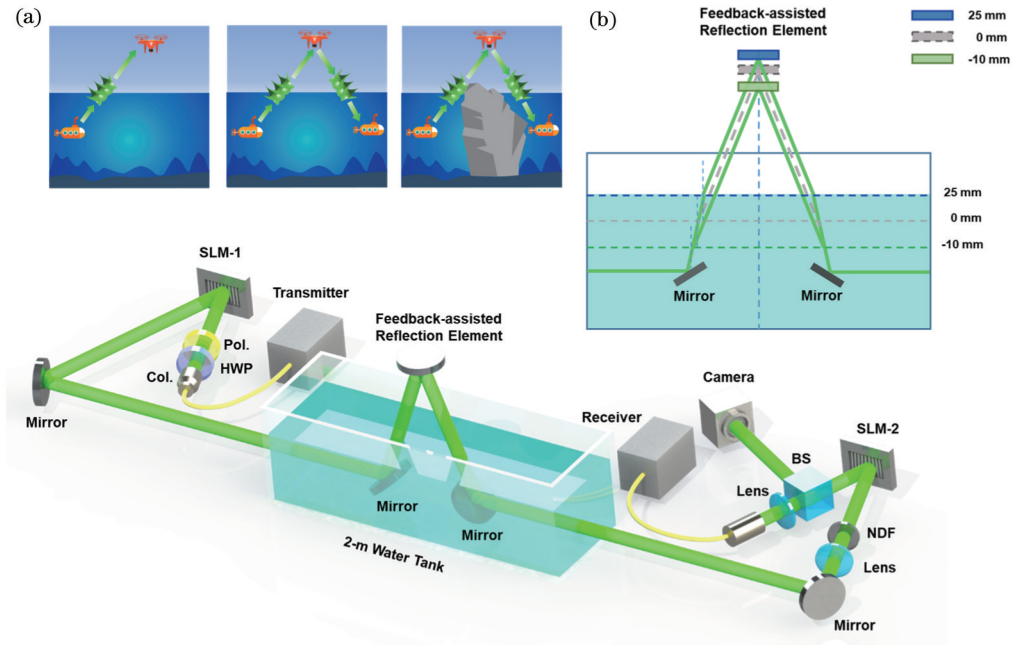


图 16 基于 OAM 模式的“水下-空气-水下”光通信<sup>[117]</sup>。(a)概念及原理示意图;(b)实验装置

Fig. 16 "Water-air-water" optical communication using OAM mode<sup>[117]</sup>. (a) Concept and principle; (b) experimental setup

光斑的位置,即使水面高度发生改变也可以保持良好的通信性能(误码率曲线几乎重合),这表明引入反馈

机制可以有效改进“水下-空气-水下”OAM 模式数据传输性能。

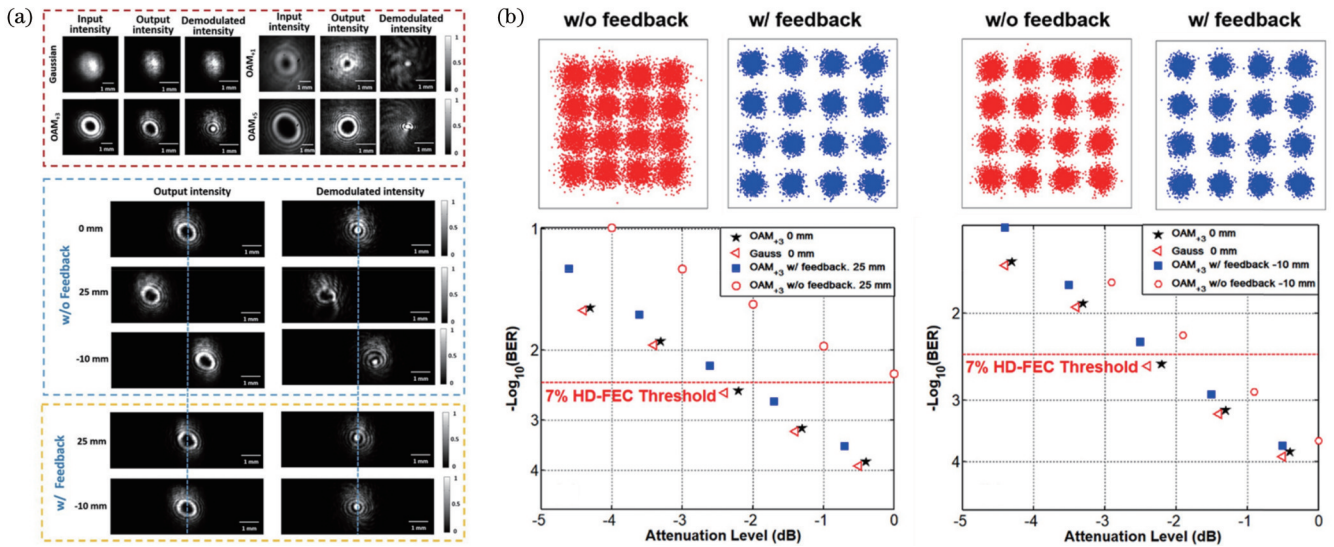


图 17 基于 OAM 模式的“水下-空气-水下”光通信实验结果<sup>[117]</sup>。(a)输入输出高斯光、OAM 模式、解调光斑及有无反馈情况下输出 OAM 模式的强度分布;(b)误码率性能

Fig. 17 Experimental results for "water-air-water" optical communication using OAM mode<sup>[117]</sup>. (a) Measured intensity distributions of input/output Gaussian beam, OAM modes, demodulated beams, and output OAM mode with and without feedback; (b) measured BER performance

2018 年,Zhao 等<sup>[118]</sup>提出并通过实验证明了利用空气-水界面的全反射非视距水下 OAM 模式光通信。为了克服空气-水界面起伏引起的光束波动和漂移,开发了自适应反馈控制系统来提供稳定的输出。此外,实验研究了微风效应、盐度(浊度)效应和垂直热梯度引起湍流效应的性能退化影响。结果表明,由微风引起的水波造成了最大的光束漂移,热梯度造成了最大的失真,而盐度则造成了最大的功率损失。利用空气-水界面全反射并采用 OAM 模式的水下无线光通信的概念和原理如图 18(a)所示,空气-水界面的全反射和接收端的自适应反馈控制系统用于实现非视距光路。自适应反馈控制系统包括两个反馈闭环的环节,因为有两个维度的位移:一个是角度位移,即漂移光束和原始光束之间的角度;另一个是横向位移,即在接收平面的横向位置偏移。实验装置如图 18(b)所示,450 nm 单模尾纤 LD 输出的高斯光通过准直器耦合到自由空间中以提供直径约为 2 mm 的蓝色高斯光束。利用半波片调节偏振态与 SLM 工作偏振方向一致以提高效率,通过在 SLM-1 上加载叉形相位图产生一个 OAM 模式;利用另一个 LD 和 SLM-2 基于类似方法来产生另一个 OAM 模式;产生的两个 OAM 模式由分束器(BS-1)合束,实现复用。利用一个长度为 2 m、宽度和高度均为 40 cm 的水箱提供水下光通信环境,充满自来水的高度约为 30 cm,水箱前的输入光和水箱后的输出光都有相同的高度,约为 25 cm。如图 19(a)所示,通过添加/抽取一些水来人为改变水面高度(每次

改变 10 mm),以此来引起光束漂移,对于一般性的接收光斑的二维抖动,使用两套 SLM 和相机[图 18(b)中 SLM-3、Camera-1 和 SLM-4、Camera-2]进行反馈控制以保持输出光路的稳定性。图 19(a)也给出了 OAM 模式复用的情况(OAM<sub>±3</sub>和 OAM<sub>0</sub>),没有引入反馈控制时,光束漂移使得无法实现成功解调,当同时进行两级反馈控制时,复用 OAM 模式稳定输出,可以被完美解调。实验进一步全面研究了垂直热梯度引起的湍流效应和加入人工海盐引起的浊度效应。垂直热梯度会改变输出光位置,图 19(b)左上图为垂直热梯度的影响,水面和水底温度分别为 24.5 °C 和 25 °C,考虑水面高度为 30 cm,因此垂直热梯度近似为 0.5 °C/30 cm,该值实际上要远大于真实场景,此时 Camera-1 上测得接收光束的最大横向漂移约为 0.15 mm,这种程度的光束偏移可以通过自适应反馈控制系统进行修正。值得注意的是,除了光束偏移,垂直热梯度带来的湍流也会引起较为严重的光束形状失真和性能劣化。实验中通过在水箱中加入人工海盐来研究浊度的影响。人工海盐包括 Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Sr<sup>+</sup>等 40 多种微量元素,通过加热和搅拌,人工海盐可以完全溶解到水里。实验中水的总质量为 250 kg,每次添加 62.5 g 人工海盐以估算和改变水的盐度。图 19(b)右上图为盐度引起的光束横向漂移的影响,当盐度为 0.5‰ 时 Camera-1 上测得的接收光束最大横向漂移约为 0.055 mm,其影响相比于垂直热梯度要小,图 19(b)左下图给出了垂直热梯度和盐度共同影响下的情况,



接收光束的最大横向漂移约为 0.21 mm。另外，图 19(b) 右下图给出了接收光功率和盐度的关系，可

见盐度的增加会引起光功率的衰减且二者近似呈线性关系。

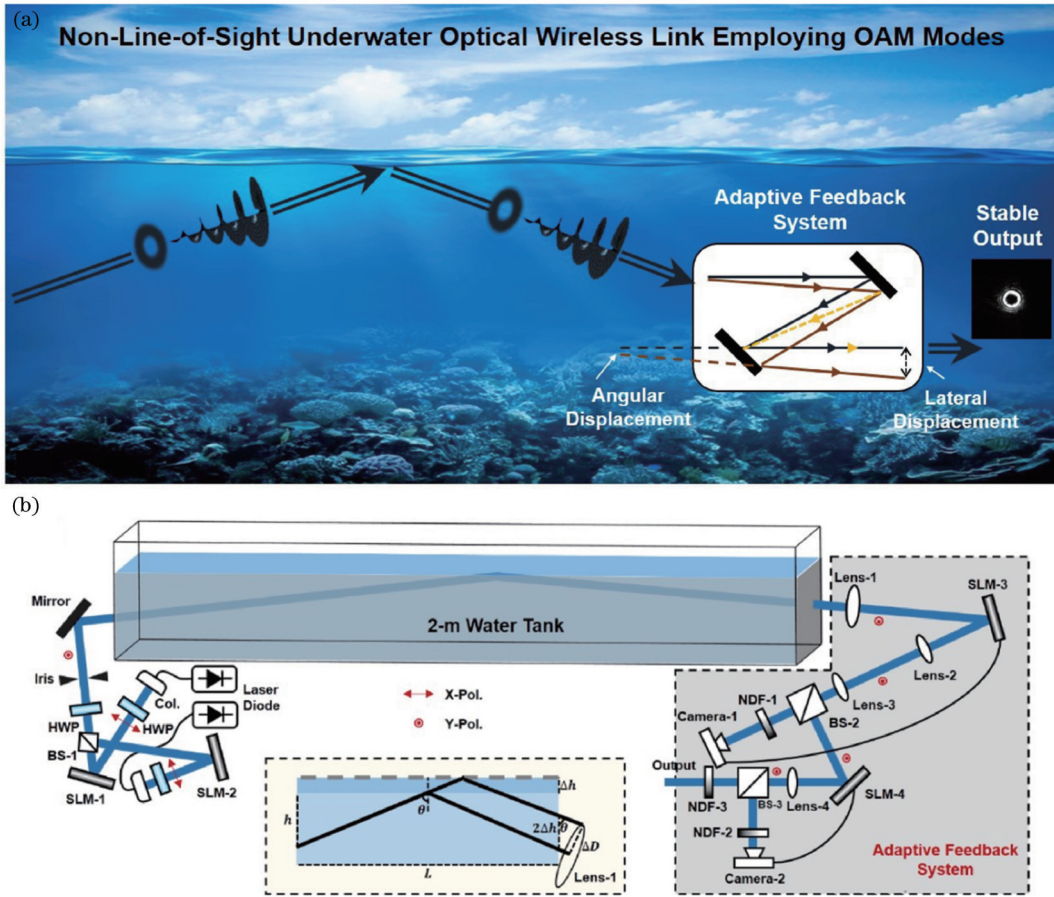


图 18 利用空气-水界面全反射基于 OAM 模式的自适应反馈控制非视距水下无线光通信<sup>[118]</sup>。(a) 概念和原理示意图；(b) 实验装置图

Fig. 18 OAM mode based adaptive feedback-control non-line-of-sight underwater wireless optical communication utilizing total reflection at air-water interface<sup>[118]</sup>. (a) Concept and principle; (b) experimental setup

### 3.4 快速自动对准辅助的 OAM 模式光通信

2022 年, Cai 等<sup>[104]</sup> 提出并通过实验报道了基于 OAM 模式的快速自动对准水下无线光通信系统。利用快速自动对准技术, 在 4 种不同的振动(发射端振动、接收端振动、发射和接收端同时振动、利用空水界面全反射非视距通信时发射和接收端同时振动)条件下, 以 244 Hz 的响应频率演示了传输总容量达 4 Gbit/s 的双 OAM 模式复用通信链路。在使用快速自动对准技术之后, 各种条件下振动的影响都大大减小, 保持了通信链路的稳定。图 20(a) 为采用 OAM 模式的快速自动对准水下无线光通信系统的概念和原理。发射器端向接收器端发送光信号, 采用 OAM 模式复用技术来提高传输容量, 为了克服水下复杂环境引起的光束抖动并获得稳定的输出, 在接收端引入快速自动对准系统。图 20(b) 给出了带快速自动对准系统的水下无线光通信的实验装置。AWG 产生两个携带 QPSK 调制格式的 1 GBaud 电信号, 经过电放大器分别对信号进行放大, 然后加载到两个 520 nm 单模尾

纤 LD 上进行直接调制。进一步使用两个 SLM 将两个 LD 输出的携带数据信息的高斯光分别转换为两个 OAM 模式, 为了有效地进行相位调制, 通过使用半波片将入射到 SLM 上的信号光偏振态调整为和 SLM 工作偏振方向一致, 再使用分束器将两个 OAM 模式复用在一起进行水下传输实验。图 21(a) 给出了 4 种振动条件下有无使用快速自动对准系统时的输出光束位置轨迹(1000 个数据点)。可以清楚地看到, 经过快速自动对准之后, 输出光束位置的分布范围明显缩小, 这说明了快速自动对准系统具有良好的输出光路稳定性。图 21 (b) 给出了不同振动条件下有无快速自动对准系统时的误码率性能。从实验结果可以看到, 如果不使用快速自动对准系统, 不同振动条件下引起的接收光束抖动太大, 以至于接收机无法有效接收到光功率, 这使得通信链路发生中断; 相比之下, 当使用快速自动对准系统时, 即使发生振动也可以稳定接收机接收到的光功率。在实验中, 不同振动条件下都可以实现稳定的通信, 且引入近似相同的 2 dB 功率代价。值得注意的是, 对于利用

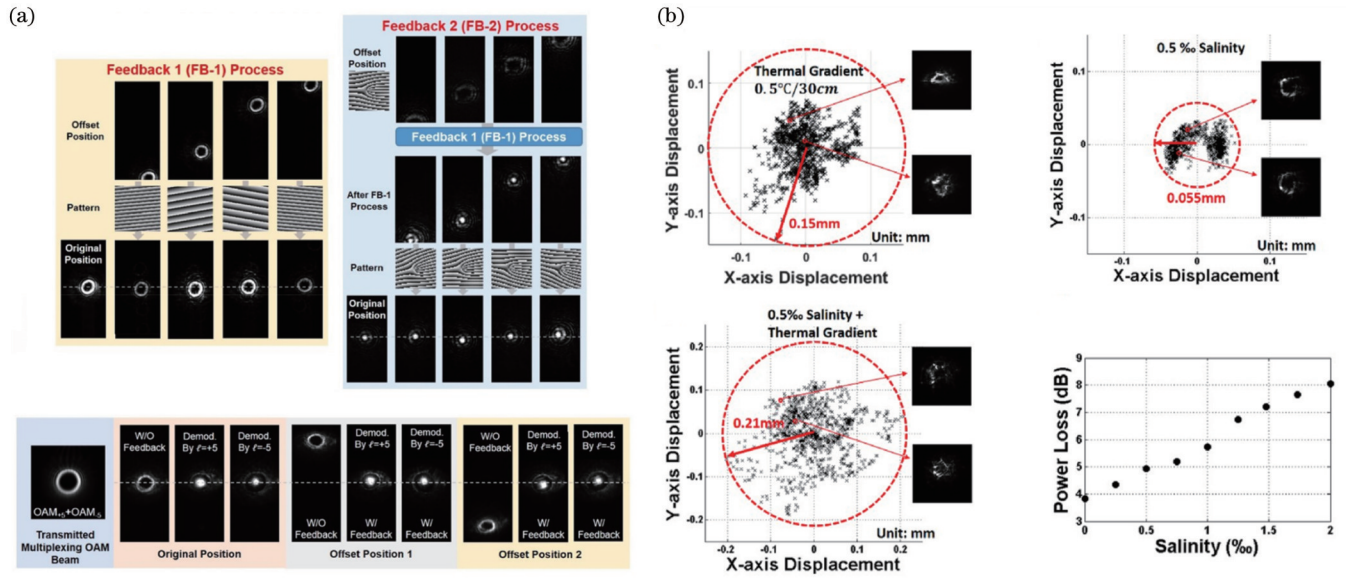


图 19 利用空气-水界面全反射的自适应反馈 OAM 模式水下光通信实验结果<sup>[118]</sup>。(a)自适应反馈系统 OAM 模式传输的测量结果；(b)热梯度和盐度影响光束漂移和功率衰减的测量结果

Fig. 19 Experimental results of feedback-enabled adaptive underwater light transmission utilizing all reflection at air-water interface<sup>[118]</sup>. (a) Measured results for transmitting OAM modes ( $OAM_{+5}$ ,  $OAM_{-5}$ ) through adaptive feedback system; (b) measured results for impact of thermal gradient and salinity on beam displacement and power loss

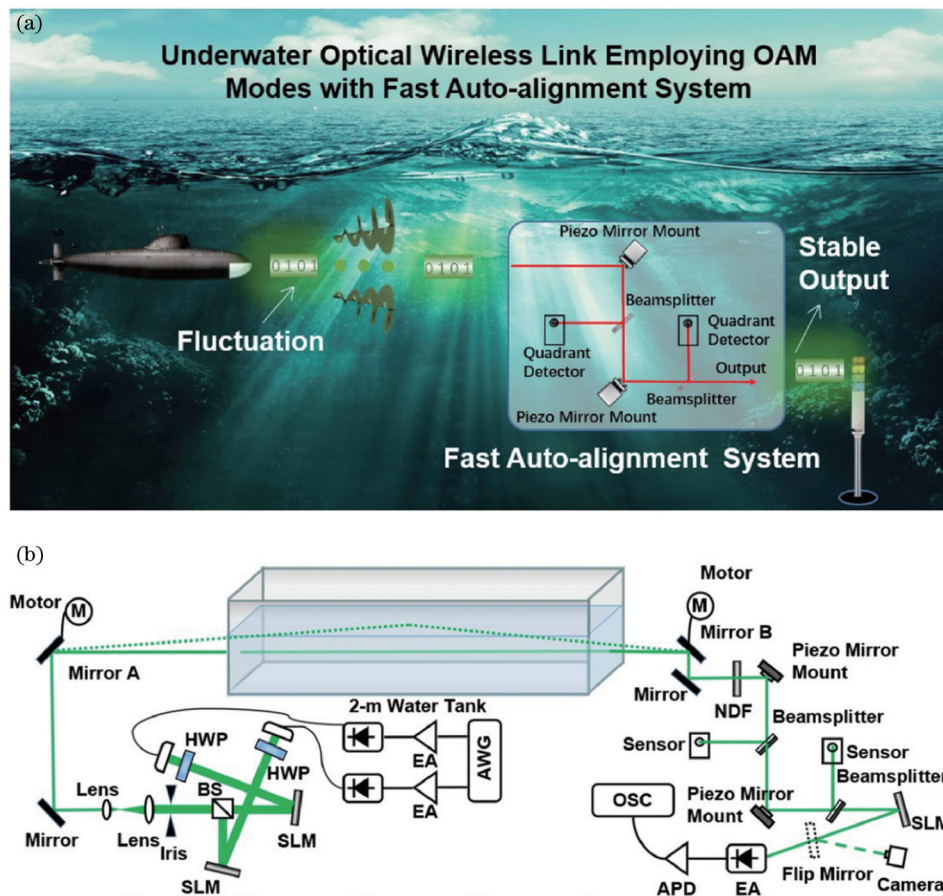


图 20 快速自动对准辅助的水下 OAM 模式复用无线光通信<sup>[104]</sup>。(a)概念和原理示意图；(b)实验装置图

Fig. 20 Fast auto-alignment assisted underwater OAM mode multiplexing wireless optical communication<sup>[104]</sup>. (a) Concept and principle; (b) experimental setup



空水界面全反射进行非视距通信的情况,由于空水界面反射引入额外的 2 dB 损耗,因此总功率代价约为 4 dB。

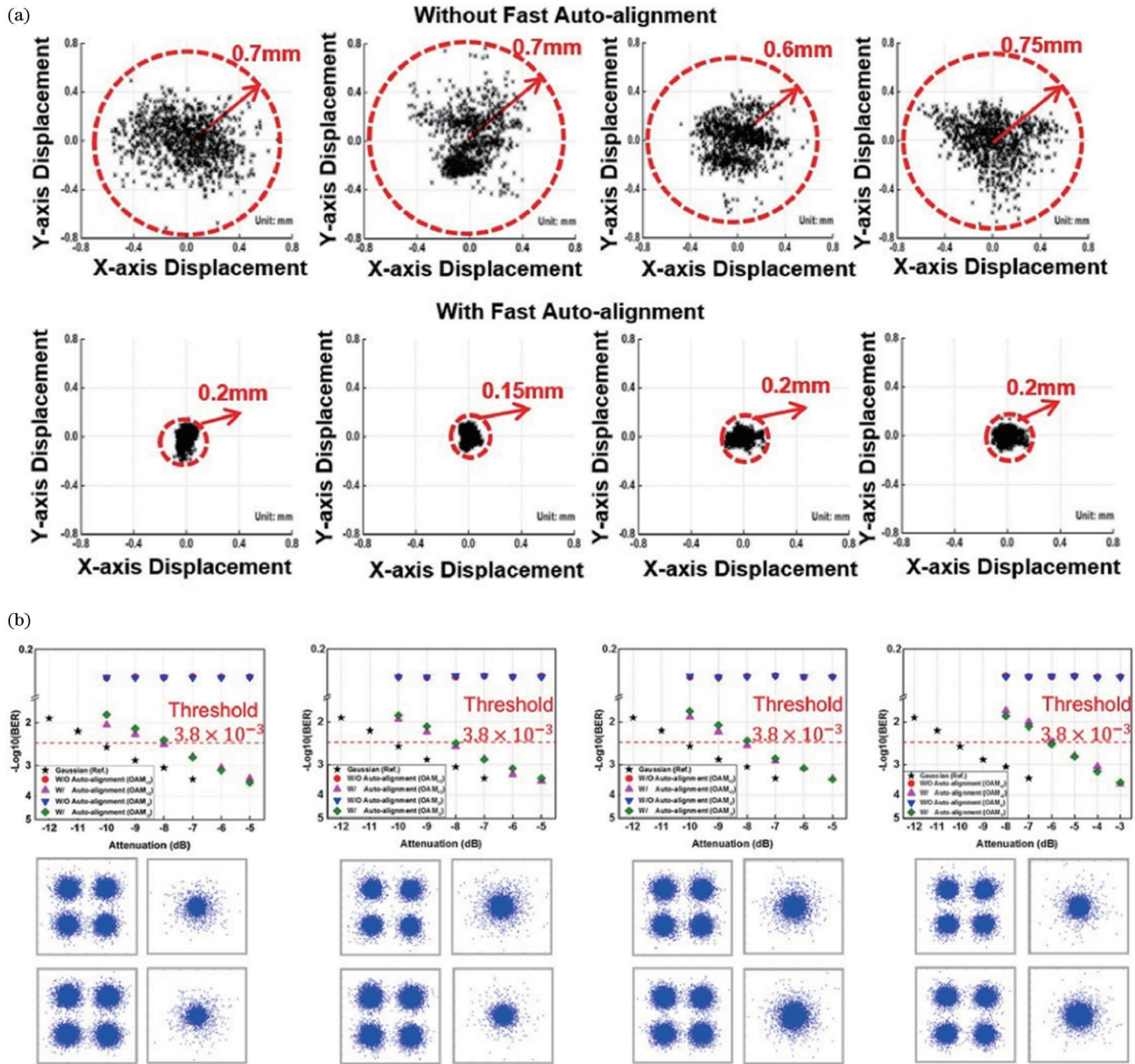


图 21 快速自动对准辅助的水下 OAM 模式通信实验结果<sup>[104]</sup>。(a)不同振动条件下的光束轨迹;(b)不同振动条件下的比特误码率性能

Fig. 21 Experimental results for fast auto-alignment assisted underwater OAM mode communication<sup>[104]</sup>. (a) Beam's trajectory under different vibration condition; (b) BER performance under different vibration condition

#### 4 水下其他结构光通信

除了上述直接叠加螺旋相位因子的 OAM 模式外,近年来,其他的一些结构光也被应用于水下光通信中。2017 年,Zhao 等<sup>[100]</sup>研究表明,在水下无线光通信中,贝塞尔光束在受到障碍物干扰时表现出更好的性能,这与其无衍射和自恢复特性有关。实验中研究了不同空间模式水下无线光通信时的性能,包括高斯光束、OAM 模式和贝塞尔光束,考察了动态气泡和静态

障碍物遮挡对三种空间模式传输的影响。图 22(a)为三种空间模式的光强分布以及水下环境中存在的气泡和障碍物遮挡干扰。高斯光具有高斯光强分布(中心亮斑)和平面波相位结构(束腰位置),OAM 模式具有环形光强分布(中心强度为零)和螺旋相位结构(中心相位奇点),贝塞尔光束具有多环状光强分布。图 22 (b)给出了实验装置图,包括发射端、水箱和接收端。在发射端,AWG 产生 1.4 GBaud 正交频分复用 16-QAM 信号,经过电放大器的放大后驱动 520 nm 激光

器产生携带数据信息的高斯光,高斯光再经过空间光调制器(SLM-1),通过加载不同的相位图形产生各种结构光,包括 OAM 模式和贝塞尔光束;水箱长 2 m、宽 40 cm、高 40 cm,水箱内装有水,通过氧气泵产生气泡干扰,其会对光束产生一定的散射和衰减,通过设置不透明小纸片来模拟障碍物遮挡,其会挡住一部分光束;在接收端,使用透镜对进行适当缩束,然后使用另一个

空间光调制器(SLM-2)加载对应的相位图形解调 OAM 模式和贝塞尔光束,解调得到的类高斯光束通过空间滤波后耦合到 APD,进行探测,使用 NDF 调节光功率以测量误码率曲线以及避免观测光强时高功率会损坏相机,APD 将光信号转换为电信号,电信号经过放大后进入示波器。对于高斯光,发射端的 SLM-1 和接收端的 SLM-2 仅加载光栅相位。

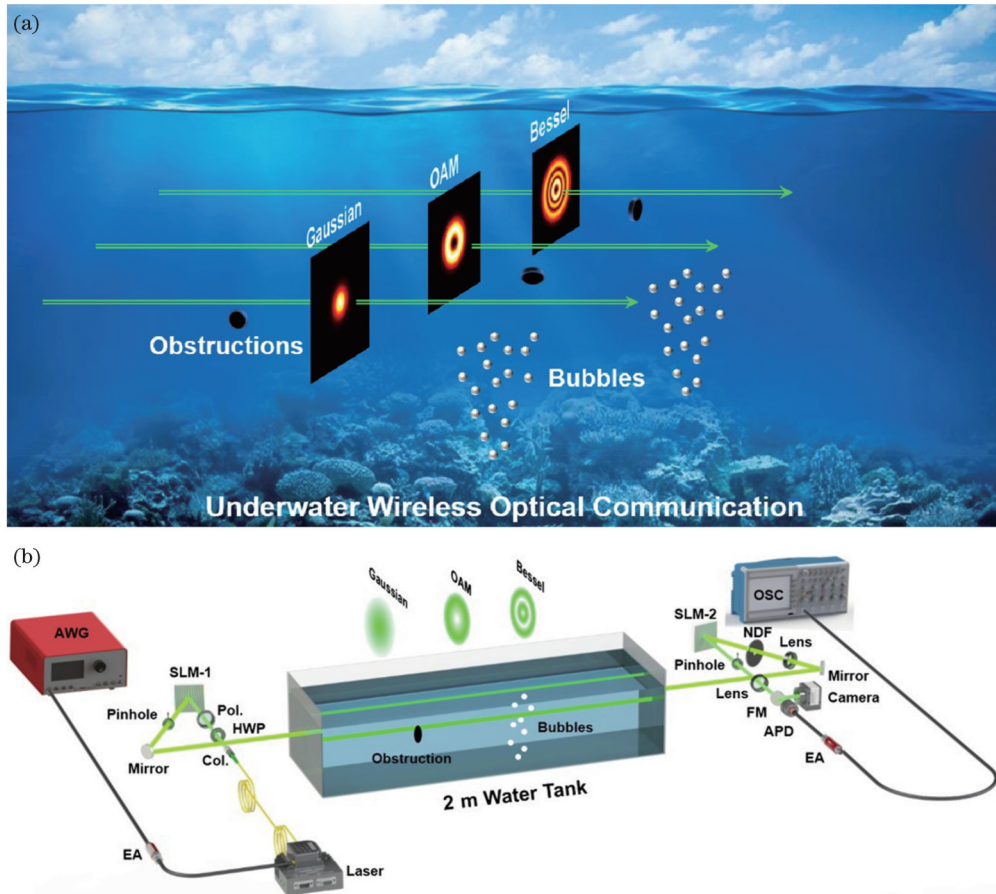


图 22 气泡和障碍物影响下不同空间模式的水下光通信<sup>[100]</sup>。(a) 三种空间模式水下无线光通信概念图;(b) 实验装置图

Fig. 22 Underwater optical communications using different spatial modes subjected to bubbles and obstructions<sup>[100]</sup>. (a) Concept of underwater wireless optical communications employing three different spatial modes; (b) experimental setup

图 23(a)给出了不同空间模式受到气泡干扰时的影响,主要表现为光功率的抖动。从图中可见:没有气泡时光功率相对稳定(抖动较小),有气泡时光功率抖动明显(约为 4 dB),同时,不同空间模式在受到气泡干扰时光功率抖动程度几乎差不多。由于气泡中是空气,不同于自由空间大气湍流会导致接收光束位置严重漂移,水下光通信受到气泡影响时,光束可以穿过气泡并伴随少量表面散射,因而接收光束位置变化较小,不过会引起功率抖动,且不依赖于具体的空间模式。图 23(b)给出了不同空间模式受到障碍物遮挡时的影响,主要表现为一定程度的光斑失真和质量劣化。从图中可见,没有障碍物遮挡时,三种空间模式经水下传输后均可以保持较好的光斑形状;当有障碍物遮挡时,高斯光和 OAM 模式在接收端均有一部分光斑被遮

挡,相比之下,贝塞尔光束受到的影响最小。图 23(c)给出了不同空间模式受到障碍物遮挡时的误码率性能。当没有障碍物遮挡时,三种空间模式的误码率性能曲线比较接近;当有障碍物遮挡时,贝塞尔光束的误码率性能最佳,其相比高斯光在误码率为  $3.8 \times 10^{-3}$  时有约 1.5 dB 的性能提升,同时,OAM 模式的误码率性能也要优于高斯光。图 23(c)也给出了 16-QAM 信号的星座图。

2020 年, Wang 等<sup>[119]</sup>利用贝塞尔-高斯光束在水下光通信中实现了抗海洋湍流的数据传输,通过使用 OOK 信号,经过 1 m 光通信链路,在不同的海洋信道条件下,如水流、温度梯度、散射和气泡,实验演示和分析了水下数据传输性能,发现这些扰动会影响光束波前,进而引起误码。研究表明,相比于高斯光束,贝塞



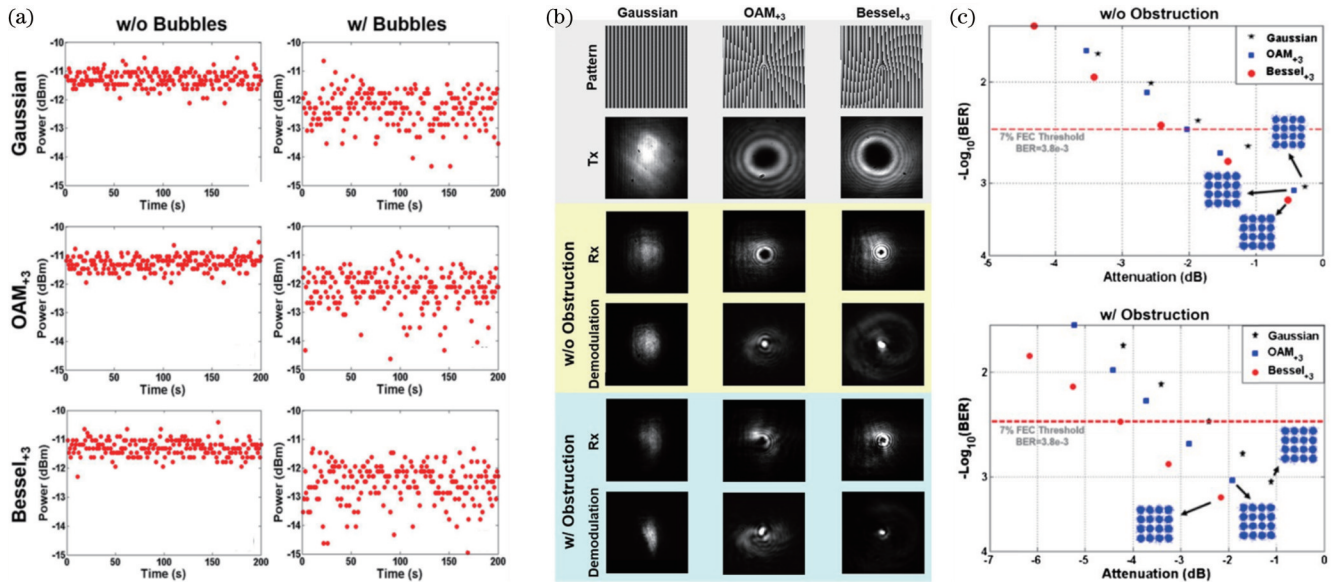


图 23 气泡和障碍物影响下不同空间模式水下光通信实验结果<sup>[100]</sup>。(a)有无气泡时不同空间模式的接收光功率;(b)有无障碍物时不同空间模式的输出光强及解调光强分布;(c)有无障碍物时不同空间模式的误码率性能

Fig. 23 Experimental results for underwater optical communications using different spatial modes subjected to bubbles and obstructions<sup>[100]</sup>. (a) Received optical power of different spatial modes with and without bubbles; (b) output intensity and demodulated intensity profiles of different spatial modes with and without obstruction; (c) measured BER performance for different spatial modes with and without obstruction

尔-高斯光束可以改善水下数据传输性能,其为抵抗水下光通信复杂环境影响提供了一种潜在的可行性选择。图 24(a)给出了实验装置的示意图。在该装置中,贝塞尔-高斯光束通过锥镜法产生,520 nm 半导体激光器由直流偏置信号和一个信号源产生的方波信号驱动。调制后的光信号经过准直器、光阑和锥镜产生贝塞尔-高斯光束。调制后的贝塞尔-高斯光束经过 1 m 长水箱传输。实验中使用了一些辅助设备来模拟不同的海洋信道条件。图 24(b)给出了多种环境下的贝塞尔-高斯光束和高斯光束的光强分布,包括仿真和实测的贝塞尔-高斯光束的光斑,以及贝塞尔-高斯光束和高斯光束分别穿过障碍物的光斑。可以看到,贝塞尔-高斯光束呈现多环形状强度分布,在经过障碍物后,贝塞尔-高斯光束仍然保持较完整的光斑,高斯光束出现了残缺,说明贝塞尔-高斯光束的自愈特性使其可以较好地抵抗障碍物影响。图 24(c)给出了在稳定的自来水以及有水流和热梯度情况下贝塞尔-高斯光束和传统高斯光束水下光通信的误码率特性,从图中可见,相同功率下,水流或热梯度的影响相比于稳定的自来水情况误码率有 1~2.5 个数量级的劣化,热梯度的影响比水流影响要更大一些,同时,贝塞尔-高斯光束的误码率要显著低于相同情况下的高斯光束。总体而言,贝塞尔-高斯光束无衍射和自愈特性使其具有更好的抗障碍物以及抗环境扰动的性能。

2021 年, Liu 等<sup>[120]</sup>提出了一种基于 CNN 的方法用于在海洋湍流信道中识别不同阶贝塞尔-高斯光束。

该方法利用了贝塞尔-高斯光束具有的无衍射和自愈特性以及 CNN 具有的学习数据多层抽象表示和提取图像固有特征的能力。通过设计一个 7 层 CNN 结构,并使用受海洋湍流扰动的贝塞尔-高斯光束的强度分布作为训练数据。通过模拟实验,验证了该 CNN 在不同海洋环境下对贝塞尔-高斯光束的识别性能,并分析了网络参数、湍流参数、训练数据集类型和编码方法对识别结果的影响。该方法为海洋无线光通信系统中贝塞尔-高斯光束的高效识别提供了一种思路和技术手段。图 25(a)为基于 CNN 识别贝塞尔-高斯光束的水下无线光通信系统。在发射端,计算机将源数据转换为数字数据,并根据模式编码在 SLM 上加载一系列特殊设计的相位图形。激光器发出的高斯光经过 SLM 后转换为不同阶数的贝塞尔-高斯光束,然后进入海洋湍流信道。在接收端, CCD 相机接收到扰动后的贝塞尔-高斯光束,并将其强度分布输入到 CNN 中进行识别。图 25(b)研究了不同湍流强度对拉盖尔-高斯光束和贝塞尔-高斯光束识别准确率的影响。在训练阶段,无论海洋湍流强度如何,拉盖尔-高斯光束和贝塞尔-高斯光束的训练准确率均达到 100%,这说明 CNN 充分学习了训练样本的特征。不过,在测试阶段,随着海洋湍流强度的增强,拉盖尔-高斯光束和贝塞尔-高斯光束的识别准确率均有下降。特别地,相较于拉盖尔-高斯光束,贝塞尔-高斯光束的识别准确率在更强的海洋湍流下才开始快速下降,可见其抗海洋湍流性能更好。图 25(c)给出了不同湍流强度下传输

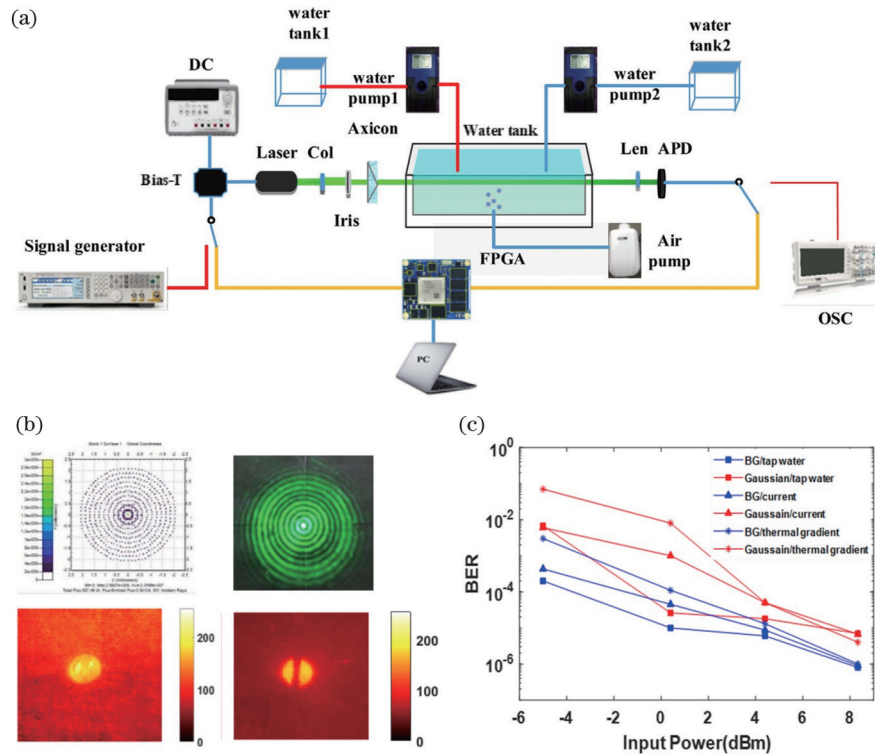


图 24 海水信道各种效应下贝塞尔-高斯光束水下数据传输的性能分析<sup>[119]</sup>。(a) 实验装置图；(b) 仿真贝塞尔-高斯光束(左上)、实测贝塞尔-高斯光束(右上)、经过障碍物的贝塞尔-高斯光束(左下)、经过障碍物的高斯光束(右下)的光强分布；(c) 水流和热梯度下的误码率性能

Fig. 24 Performance analyses on underwater data transmission using Bessel-Gaussian beams in simulated ocean channel with various effects<sup>[119]</sup>. (a) Experimental setup; (b) intensity distributions of simulated Bessel-Gaussian beam (upper left), generated Bessel-Gaussian beam (upper right), Bessel-Gaussian beam passing through obstacle (lower left), and Gaussian beam passing through obstacle (lower right); (c) measured BER performance under water current and thermal gradient

距离对 CNN 识别准确率的影响。在弱海洋湍流下, CNN 在 150 m 处的识别准确率超过 99%; 在中等海洋湍流下, 即使 CNN 识别准确率有所下降, 在 150 m 处的识别准确率仍能达到 95% 以上; 在强海洋湍流下, CNN 在传输距离大于 60 m 时的识别准确率快速下降, 因此在强海洋湍流和长距离传输场景中应用 CNN 识别还需要其他技术辅助来提高识别准确率, 例如光功率放大、自适应光学等。

2023 年, Robertson 等<sup>[121]</sup> 利用因斯高斯(IG) 光束恒定包络调制的方法实现大带宽水下无线光通信。该方法利用二次谐波产生过程生成并调制因斯高斯光束, 通过控制二次谐波过程的相位匹配条件, 可以控制生成模式的系数, 通过将数据调制在光束的相位上, 实现恒定包络调制。图 26(a) 给出了二次谐波过程产生因斯高斯光束的实验装置图。该装置主要由激光器、任意波形发生器、相位调制器、螺旋相位板、PPLN 晶体、PIN 光电探测器等组成。激光器产生的 1064 nm 高斯光束, 通过分束比为 50:50 的耦合器分为两路, 分别经过相位调制器和放大器, 每一路再通过螺旋相位板生成 OAM 光束, 然后通过合束比为 50:50 的合束器进行合束, 这样便构建了一个马赫-曾德尔干涉仪, 其中有光纤链路也有自由空间路径。之后, 利用分束比

为 90:10 的分束器为干涉仪提供反馈控制, 其通过一个低频相位调制器[图 26(a) 中干涉仪下臂相位调制器, 3 dB 带宽为 150 MHz]实现两路模式相对相位的锁定。两路相干合成 OAM 光束(拓扑电荷数相反) 作为泵浦光输入 PPLN 晶体, 通过二次谐波过程产生 532 nm 因斯高斯光束, 然后经过水下通道传输[图 26(a) 插图], 水下通道采用 3 m 长的水管, 其支持双向传输, 在水中通过添加抗酸剂调节浊度和模拟真实水下复杂环境。由任意波形发生器提供电域数据信息, 其经过放大后加载到相位调制器[图 26(a) 中干涉仪上臂相位调制器, 3 dB 带宽为 12 GHz]上, 这样数据信息就加载到了合成因斯高斯光束的两路 OAM 光束的相对相位上, 该数据信息可以采用 QAM 高级调制格式。图 26(b) 给出了通过改变相位匹配条件生成不同模式系数的光束。图 26(c) 给出了不同调制格式情况下因斯高斯光束的误码率随衰减长度的变化关系。随着衰减长度的增加, 误码率性能会劣化。同时, 更高速率的 25 Gbit/s 32-QAM 信号的误码率相比 20 Gbit/s 16-QAM 信号也会劣化。因斯高斯光束也具有无衍射特性, 其相比高斯光在复杂介质中传输时表现出更好的鲁棒性。为了进一步提升通信容量, 未来可以考虑使用两个偏振以及多个因斯高斯光束。



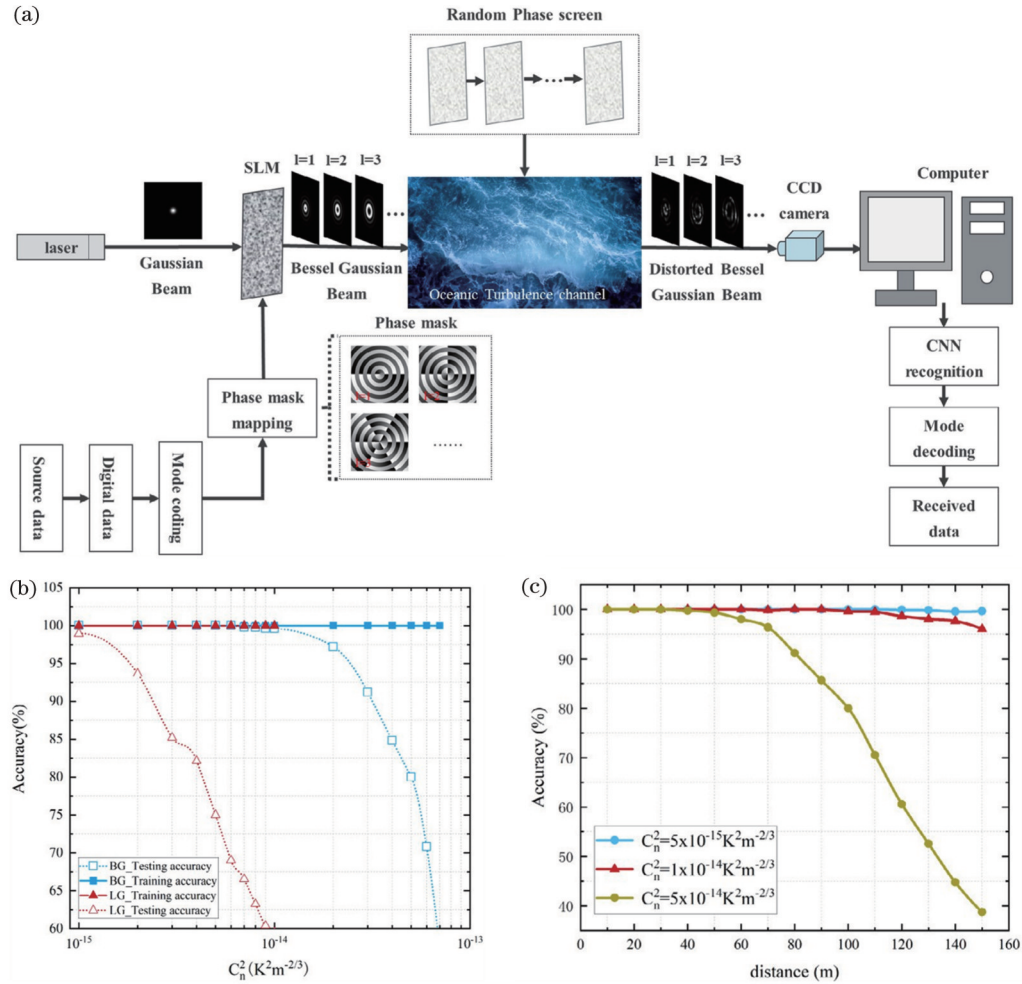


图 25 基于 CNN 识别贝塞尔-高斯光束的水下无线光通信系统<sup>[120]</sup>。(a) 实验装置;(b) 不同湍流强度下拉盖尔-高斯光束和贝塞尔-高斯光束的 CNN 识别准确率;(c) 不同湍流强度下 CNN 识别准确率随传输距离的变化

Fig. 25 Underwater wireless optical communication system based on CNN recognition of Bessel-Gaussian beams<sup>[120]</sup>. (a) Experimental setup; (b) accuracy of CNN for recognizing Laguerre-Gaussian and Bessel-Gaussian beams under different turbulence intensities; (c) recognition accuracy of CNN versus transmission distance under different turbulence intensities

## 5 基于 OAM 模式的复杂介质光通信

除了水下无线光通信, OAM 模式也应用于自由空间无线光通信。水下扰动环境和大气扰动环境都属于复杂介质情况。由于大气信道中存在着湍流和散射等影响, OAM 模式传输时也不可避免地会失真, 同时伴随功率衰减和光束抖动, 进而严重劣化通信性能, 这需要采取相应的补偿措施。近年来, 基于 OAM 模式的复杂介质光通信也值得特别关注<sup>[122-123]</sup>。

2021 年, Liang 等<sup>[122]</sup>通过引入湍流补偿和快速自动对准装置构成的自适应系统, 提出并通过实验实现了一个有效对抗湍流和振动影响的光通信系统。图 27(a)给出了这种补偿湍流和振动影响的自适应光通信系统的实验装置。输出激光经过调制器的调制 (AWG 提供驱动信号) 后加载信息, 然后经准直器的准直耦合到自由空间中, 通信链路中使用湍流屏来模拟大气湍流影响, 然后, 激光入射到 SLM 上, 通过加载

特定的相位图形来补偿大气湍流影响。实验中采用 6 个不同的湍流相位屏来模拟大气湍流影响, 利用基于泽尼克多项式的随机并行梯度下降 (SPGD) 算法进行湍流补偿, 其不需要使用波前传感器, 而是仅根据相机记录的光束强度分布, 通过算法迭代优化加载到 SLM 上的相位图形, 进而进行补偿, 因此该方法更加简单, 具有潜在实用价值。除了湍流影响, 实验装置中也使用一个振动频率为 196 Hz 的电机 [与图 27(a) 中反射镜 M2 连接形成电动反射镜] 来模拟振动影响, 从而引起光束的角度和横向偏移。实验中引入快速自动对准装置来补偿振动影响, 其包括两级对准, 每一级包括一个四象限探测器、一个位置传感器 (PSD)、两个压电控制器、一个分束器和一个压电反射镜支架 (PMM), 利用四象限探测器和位置传感器测量分束器分出的光的偏移并通过压电控制器 (响应频率 244 Hz) 提供的驱动电压驱动压电反射镜, 以调整光束对准探测中心, 通过两级快速自动对准可以很好地补偿光束的角度和横

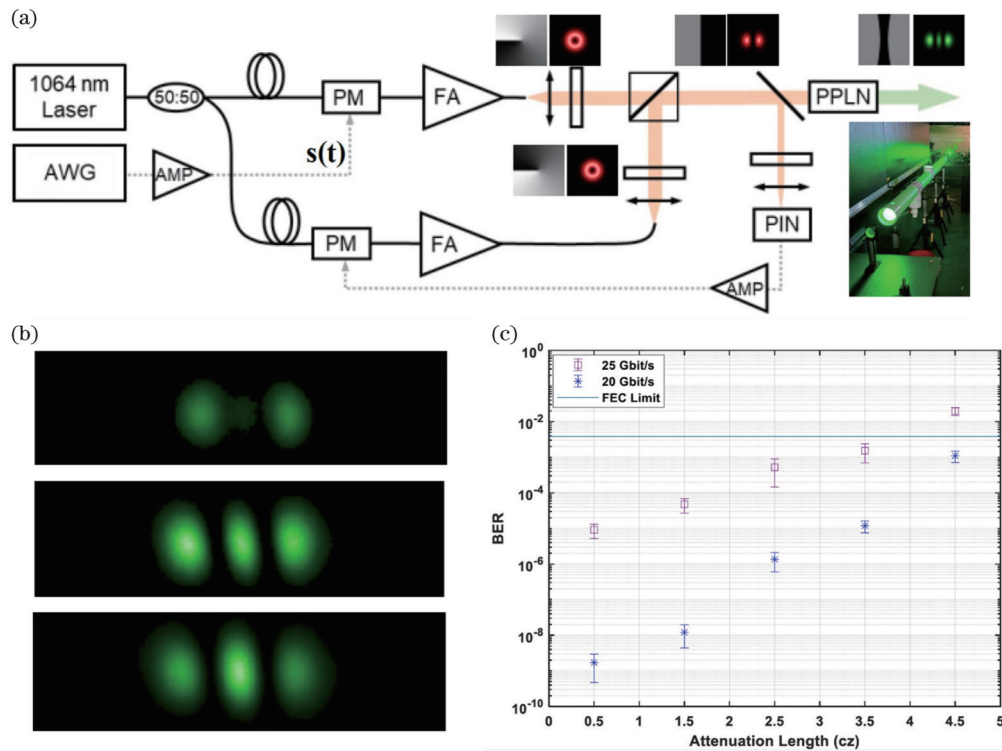


图 26 基于因斯高斯光束恒定包络调制的大带宽水下无线光通信<sup>[121]</sup>。(a)二次谐波过程产生因斯高斯光束的实验装置图;(b)不同相位匹配条件生成的不同模式系数的因斯高斯光束强度分布;(c)不同调制格式情况下因斯高斯光束的误码率随衰减长度的变化关系

Fig. 26 Constant-envelope modulation of Ince-Gaussian beams for high-bandwidth underwater wireless optical communication<sup>[121]</sup>. (a) Experimental setup for generating Ince-Gaussian beams through second-harmonic process; (b) intensity distribution of Ince-Gaussian beams with different mode coefficient under different phase matching conditions; (c) BER of Ince-Gaussian beams versus attenuation length for different modulation formats

向偏移。利用自适应湍流补偿和快速自动对准系统,实验测试了OAM模式光通信在湍流和振动影响下的误码率性能,其中OAM模式携带10 GBaud强度调制直接检测(IM/DD)16-QAM信号,实验结果如图27(b)所示。从图中可见,湍流和振动的影响会严重劣化OAM模式光通信性能,通过自适应湍流补偿和快速自动对准,功率代价可以改进约8 dB,图中也给出了16-QAM星座图,这说明自适应湍流补偿和快速自动对准技术可以有效提升OAM模式复杂介质光通信性能。相应的技术也可以应用于水下环境OAM模式光通信中。

## 6 总结及未来发展趋势和展望

OAM开发了光波的空间新维度资源,这为光通信的可持续扩容提供了新途径。在信息一体化趋势下,OAM光通信技术也逐步应用于自由空间、光纤、水下等多样性场景。本文全面总结了近年来水下OAM光通信技术的研究进展。本文对水下无线通信技术的发展历程进行了简要梳理,包括水下声波通信、水下电磁波通信、水下光波通信。针对水下光通信,重点聚焦基于OAM模式的水下无线光通信:一方面介

绍了OAM模式的基本原理及主要产生和测量方法;另一方面详细阐述了水下OAM模式无线光通信的研究进展,包括水下OAM模式编译码通信、水下OAM模式复用通信、水下OAM模式广播通信等。在此基础上,进一步介绍了涉空水界面的OAM模式光通信(“水下-空气-水下”跨空水介质、“空气-水”界面全反射)以及快速自动对准辅助的OAM模式光通信。除了介绍OAM模式,同时也拓展介绍了水下其他结构光通信,另外,对基于OAM模式的复杂介质光通信(自适应湍流补偿和快速自动对准)也进行了介绍。

水下OAM模式光通信研究一方面利用OAM模式,另一方面聚焦水下光通信。本文回顾了近年来该领域取得的一系列研究进展,国内外相关研究工作还有很多,本文也不免会有遗漏,未来发展也有更加迅速之势。图28描绘了水下OAM模式光通信未来的发展趋势。在OAM模式层面,更加灵活和更强功能的空



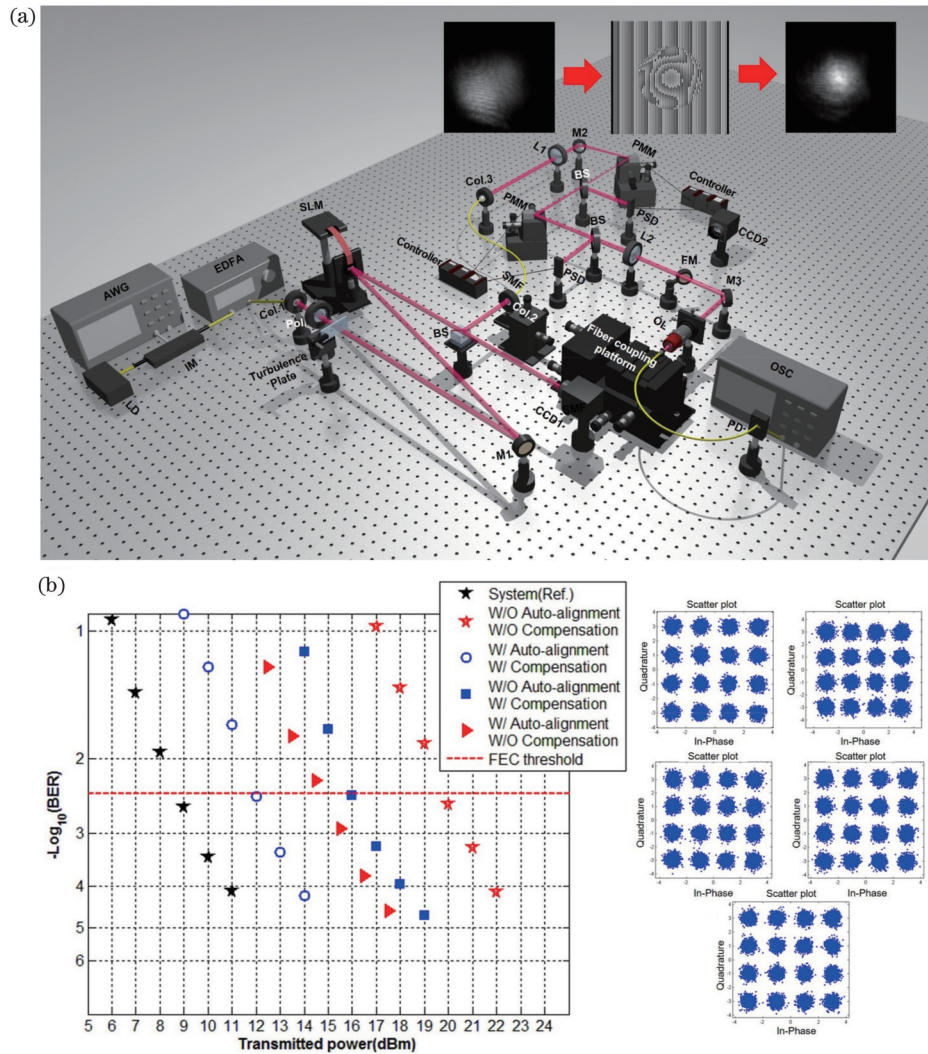


图 27 补偿湍流和振动影响的自适应 OAM 模式光通信系统<sup>[122]</sup>。(a)实验装置图;(b)误码率性能

Fig. 27 Adaptive OAM mode optical communication system against turbulence and vibration<sup>[122]</sup>. (a) Experimental setup; (b) BER performance

还比较少,因此还没有充分发挥出空间维度优势,使用更多的 OAM 模式是一个趋势,也是更有效提升光通信容量的重要途径;从 OAM 模式拓展到广义的结构光也是一个重要研究方向,除了可以更充分地开发空间维度,结构光还有望在水下复杂环境中抵抗湍流和扰动等影响,进而有效改进通信性能;同时, OAM 模式具有兼容性,空间维度(如 OAM)融合传统维度(如波长、时间、复振幅、偏振)的多维光通信技术可以更加有效地提升光通信容量,也是重要研究方向。在水下光通信层面,目前研究人员虽然报道了很多实验研究,但大多都是模拟实验,并非在真实的海洋环境中进行,未来水下光通信特别是海洋光通信的一个重要发展趋势是走向真实场景,面对真实的海洋复杂环境,需要系统分析各种盐度、温度、浊度以及复杂湍流和水文条件下复杂信道模型及其影响,厘清复杂信道光场和信号损伤机制;大容量是水下光通信未来发展的必然趋势,这也是引入 OAM 模式及结构光的一个

重要原因;长距离是水下光通信的另一个趋势,这也是目前水下光通信的短板所在,蓝绿光虽然适合水下光通信,但传输距离仍然有限,弱光高灵敏探测是一个发展方向;高鲁棒性是水下光通信的又一个趋势,这也是复杂介质光通信包括水下场景高可靠光通信所期望的特性。水下 OAM 模式光通信的这些未来发展趋势离不开核心的器件和技术,包括激光器、调制器、探测器、转换器、复用解复用器等。为了实现大容量,需要高速直调激光器或者高速调制器,也需要更多的 OAM 模式通道,这就需要可扩展的多通道 OAM 模式复用解复用器。另外,也可以在近红外波段产生高速信号,然后通过非线性波长转换将其转换到可见光波段(如 1064 nm 倍频到 532 nm),这就需要高效率波长转换器;为了实现长距离,需要高功率的激光器,同时也可以利用弱光探测技术,这需要高灵敏的探测器;为了实现高鲁棒性,可以充分利用结构光,这需要对应的空间光场调控器件。与此同时,也希

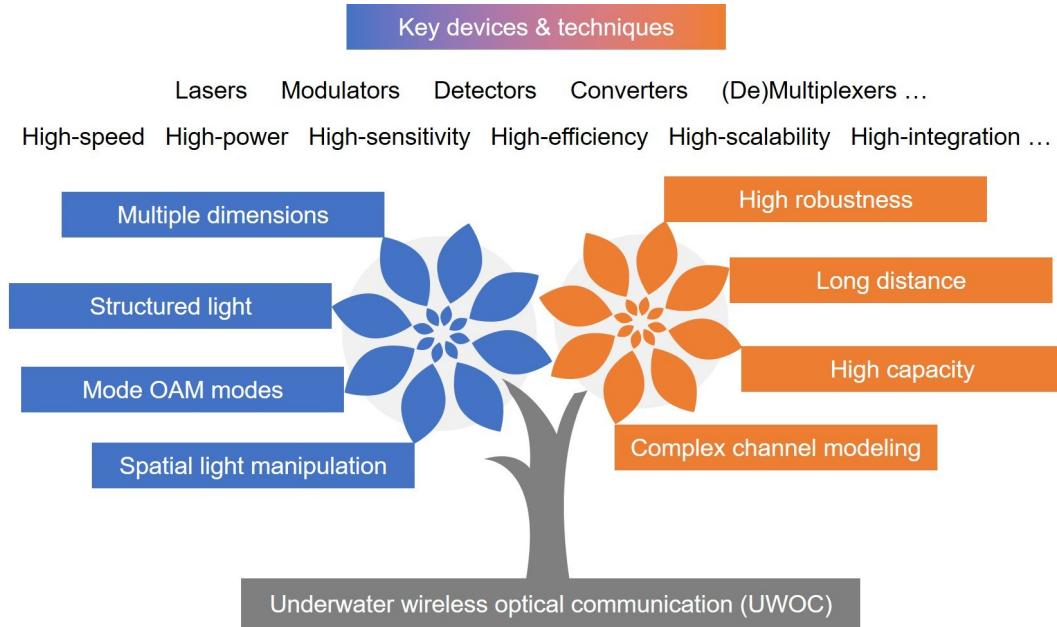


图 28 水下轨道角动量光通信的未来发展趋势

Fig. 28 Future development trend of underwater OAM optical communications

望所有这些器件可以实现高集成、小尺寸和轻量型,以便得到更好的应用。

除了上述发展趋势外,图 29 描绘了水下无线光通信的未来展望,一个重要特点是融合。一方面,水下无线光通信技术,包括水下 OAM 模式及结构光通信,无法满足水下环境各种通信需求,因此,需要水下无线光波通信、电磁波(射频)通信、声波通信的有机融合,根

据不同的应用场景以及不同的容量和距离需求,可以选择合适的一种或者多种通信方式及其组合;另一方面,对于广袤的海洋,除了海洋环境的通信,海洋资源的感知探测也极为重要,水下光通信技术结合水下感知技术的“通感一体化”也是未来的重要研究方向,对于提高海洋资源开发能力、发展海洋经济、保护海洋生态环境、服务海洋强国战略具有重要意义。

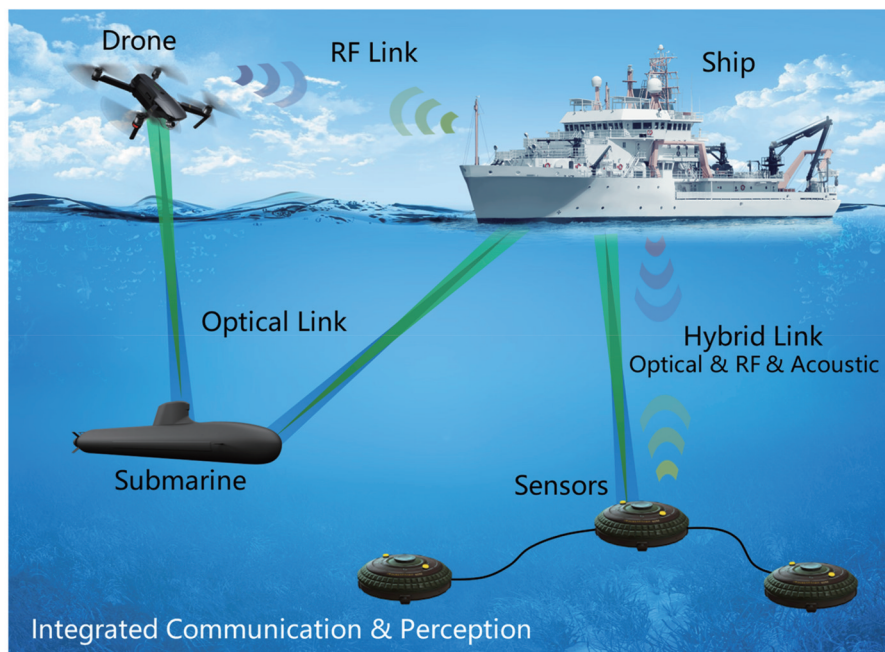


图 29 水下无线光通信未来展望

Fig. 29 Future perspective of underwater wireless optical communications



## 参 考 文 献

- [1] Che X H, Wells I, Dickens G, et al. Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(12): 143-151.
- [2] Al-Shamma'a A I, Shaw A, Saman S. Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(11): 2843-2849.
- [3] Al-Kinani A, Wang C X, Zhou L, et al. Optical wireless communication channel measurements and models[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 1939-1962.
- [4] Uysal M, Nouri H. Optical wireless communications: an emerging technology[C]//2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 6-10, 2014, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2014.
- [5] 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.
- [6] Strand M P. Imaging model for underwater range-gated imaging systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1537: 151-160.
- [7] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(1): 226-234.
- [8] Laux A, Billmers R, Mullen L, et al. The a, b, c, s of oceanographic lidar predictions: a significant step toward closing the loop between theory and experiment[J]. *Journal of Modern Optics*, 2002, 49(3/4): 439-451.
- [9] 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.
- [10] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [11] Wang J. Twisted optical communications using orbital angular momentum[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, 62(3): 034201.
- [12] Wang J, Liu J, Li S H, et al. Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications[J]. *Nanophotonics*, 2021, 11(5/6): 527.
- [13] 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: 488-496.
- [14] Wang J, Chen S, Liu J. Orbital angular momentum communications based on standard multi-mode fiber (invited paper)[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(6): 060804.
- [15] Wang J, Cai C K, Cui F, et al. Tailoring light on three-dimensional photonic chips: a platform for versatile OAM mode optical interconnects[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(3): 036004.
- [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.
- [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] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(1): 72-83.
- [19] Quazi A, Konrad W. Underwater acoustic communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1982, 20(2): 24-30.
- [20] Martelli P, Gatto A, Boffi P, et al. Free-space optical transmission with orbital angular momentum division multiplexing[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(17): 972-973.
- [21] Zielinski A, Yoon Y H, Wu L X. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1995, 20(4): 293-299.
- [22] Ochi H, Watanabe Y, Shimura T. Basic study of underwater acoustic communication using 32-quadrature amplitude modulation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(6B): 4689.
- [23] Esmail H, Qasem Z A H, Sun H X, et al. Wireless information and power transfer for underwater acoustic time-reversed NOMA[J]. *IET Communications*, 2020, 14(19): 3394-3403.
- [24] Qasem Z A H, Leftah H A, Sun H X, et al. Deep learning-based code indexed modulation for autonomous underwater vehicles systems[J]. *Vehicular Communications*, 2021, 28: 100314.
- [25] Saeed N, Celik A, Al-Naffouri T Y, et al. Underwater optical wireless communications, networking, and localization: a survey [J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, 94: 101935.
- [26] Guan Q S, Ji F, Liu Y, et al. Distance-vector-based opportunistic routing for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 3831-3839.
- [27] Shi C Z, Dubois M, Wang Y, et al. High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(28): 7250-7253.
- [28] Jiang S M. State-of-the-art medium access control (MAC) protocols for underwater acoustic networks: a survey based on a MAC reference model[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(1): 96-131.
- [29] Zhu Z H, Gao W, Mu C Y, et al. Reversible orbital angular momentum photon-phonon conversion[J]. *Optica*, 2016, 3(2): 212-217.
- [30] Jiang X, Li Y, Liang B, et al. Convert acoustic resonances to orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(3): 034301.
- [31] Climent S, Sanchez A, Capella J V, et al. Underwater acoustic wireless sensor networks: advances and future trends in physical, MAC and routing layers[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 795-833.
- [32] Stojanovic M, Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 84-89.
- [33] Chitre M, Shahabudeen S, Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 103-116.
- [34] Song H C, Roux P, Hodgkiss W S, et al. Multiple-input-multiple-output coherent time reversal communications in a shallow-water acoustic channel[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(1): 170-178.
- [35] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 257-279.
- [36] Freitag L, Stojanovic M, Singh S, et al. Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 586-593.
- [37] Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1996, 21(2): 125-136.
- [38] Murad M. Assessment and performance improvement of multicarrier modulation for underwater acoustic communications [D]. Málaga: Universidad De Málaga, 2022.
- [39] Li B S, Huang J, Zhou S L, et al. MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 34(4): 634-644.
- [40] Pompili D, Akyildiz I F. Overview of networking protocols for

- underwater wireless communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 97-102.
- [41] Partan J, Kurose J, Levine B N. A survey of practical issues in underwater networks[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2007, 11(4): 23-33.
- [42] Au W W, Nachtigall P E, Pawloski J L. Acoustic effects of the ATOC signal (75 Hz, 195 dB) on dolphins and whales[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 101(5 Pt 1): 2973-2977.
- [43] Moore R K. Radio communication in the sea[J]. *IEEE Spectrum*, 1967, 4(11): 42-51.
- [44] Shaw A, Al-Shamma'a A I, Wylie S R, et al. Experimental investigations of electromagnetic wave propagation in seawater [C]//2006 European Microwave Conference, September 10-15, 2006, Manchester, UK. New York: IEEE Press, 2006: 572-575.
- [45] Uribe C, Grote W. Radio communication model for underwater WSN[C]//2009 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security, December 20-23, 2009, Cairo, Egypt. New York: IEEE Press, 2009.
- [46] Lloret J, Sendra S, Ardid M, et al. Underwater wireless sensor communications in the 2.4 GHz ISM frequency band[J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 4237-4264.
- [47] Ryecroft S, Shaw A, Fergus P, et al. A first implementation of underwater communications in raw water using the 433 MHz frequency combined with a bowtie antenna[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1813.
- [48] Azar S N, Erdemir O, Soomro M, et al. A hybrid acoustic-RF communication framework for networked control of autonomous underwater vehicles: design and cosimulation[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2022, 30(4): 1475-1491.
- [49] Ganesh P S S P, Venkataraman H. RF-based wireless communication for shallow water networks: survey and analysis [J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 120(4): 3415-3441.
- [50] Ramdhan M S M, Ali M, Effiyana G N, et al. Measuring the underwater received power behavior for 433 MHz radio frequency based on different distance and depth for the development of an underwater wireless sensor network[J]. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2019, 8(3): 1066-1073.
- [51] Omeke K G, Abohmr A, Imran M A, et al. Characterization of RF signals in different types of water[C]//Antennas and Propagation Conference 2019 (APC-2019), November 11-12, 2019, Birmingham, UK. London: IET, 2019: 1-6.
- [52] Li Y Z, Wang S N, Jin C, et al. A survey of underwater magnetic induction communications: fundamental issues, recent advances, and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2466-2487.
- [53] Guo H Z, Sun Z, Wang P. Multiple frequency band channel modeling and analysis for magnetic induction communication in practical underwater environments[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(8): 6619-6632.
- [54] Qureshi U M, Shaikh F K, Aziz Z, et al. RF path and absorption loss estimation for underwater wireless sensor networks in different water environments[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 890.
- [55] Sendra S, Lloret J, Rodrigues J J P C, et al. Underwater wireless communications in freshwater at 2.4 GHz[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(9): 1794-1797.
- [56] Hattab G, El-Tarhuni M, Al-Ali M, et al. An underwater wireless sensor network with realistic radio frequency path loss model[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(3): 508708.
- [57] Zoksimovski A, Rappaport C, Sexton D, et al. Underwater electromagnetic communications using conduction: channel characterization[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Underwater Networks & Systems, November 5-6, 2012, Los Angeles, California. New York: ACM Press, 2012.
- [58] Cella U M, Johnstone R, Shuley N. Electromagnetic wave wireless communication in shallow water coastal environment: theoretical analysis and experimental results[C]//Proceedings of the 4th International Workshop on Underwater Networks, November 3, 2009, Berkeley, California. New York: ACM Press, 2009.
- [59] Liu L B, Zhou S L, Cui J H. Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks[J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2008, 8(8): 977-994.
- [60] Gussen C M G, Diniz P S R, Campos M L R, et al. A survey of underwater wireless communication technologies[J]. *Journal of Communication and Information Systems*, 2016, 31(1): 242-255.
- [61] Duntley S Q. Light in the sea[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(2): 214-233.
- [62] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 277-283.
- [63] Cossu G, Corsini R, Khalid A M, et al. Experimental demonstration of high speed underwater visible light communications[C]//2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), October 21, 2013, Newcastle Upon Tyne, UK. New York: IEEE Press, 2013: 11-15.
- [64] Oubei H M, Duran J R, Janjua B, et al. 4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23302-23309.
- [65] Fei C, Zhang J W, Zhang G W, et al. Demonstration of 15-M 7.33-gb/s 450-nm underwater wireless optical discrete multitone transmission using post nonlinear equalization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(3): 728-734.
- [66] Wang J L, Yang X Q, Lv W C, et al. Underwater wireless optical communication based on multi-pixel photon counter and OFDM modulation[J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 181-185.
- [67] Du J, Wang Y, Fei C, et al. Experimental demonstration of 50-m/5-Gbps underwater optical wireless communication with low-complexity chaotic encryption[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 783-796.
- [68] Du Z H, Ge W M, Cai C Y, et al. 90-m/660-mbps underwater wireless optical communication enabled by interleaved single-carrier FDM scheme combined with sparse weight-initiated DNN equalizer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(16): 5310-5320.
- [69] 季秀阳, 殷洪玺, 景连友, 等. 基于强波动理论的强湍流信道水下无线光通信系统性能分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1801001.
- Ji X Y, Yin H X, Jing L Y, et al. Performance analysis of underwater wireless optical communication system with strong turbulence channels based on strong fluctuation theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1801001.
- [70] 韦育, 于永河, 黑小兵, 等. 涡旋光束和光子计数在水下光通信中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1301001.
- Wei Y, Yu Y H, Hei X B, et al. Application of vortex beam and photon counting in underwater optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1301001.
- [71] 刘海达, 黑小兵, 杨洋, 等. 用于水下光通信高维调制与解调的轨道角动量叠加态[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 0901001.
- Liu H D, Hei X B, Yang Y, et al. Orbital angular momentum in a superposition state for high-dimensional modulation and demodulation in underwater optical communication[J]. *Laser &*



- Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0901001.
- [72] Watson M A, Blanchard P M, Stace C, et al. Assessment of laser tracking and data transfer for underwater optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9248: 92480T.
- [73] Oubei H M, Durán J R, Janjua B, et al. Wireless optical transmission of 450 nm, 3.2 Gbit/s 16-QAM-OFDM signals over 6.6 m underwater channel[C]//2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 5-10, 2016, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [74] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27937-27947.
- [75] Wang P L, Li C, Xu Z Y. A cost-efficient real-time 25 Mb/s system for LED-UOWC: design, channel coding, FPGA implementation, and characterization[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(13): 2627-2637.
- [76] Zou P, Liu Y F, Wang F M, et al. Enhanced performance of odd order square geometrical shaping QAM constellation in underwater and free space VLC system[J]. Optics Communications, 2019, 438: 132-140.
- [77] Wang F M, Liu Y F, Shi M, et al. 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 056117.
- [78] Wang J M, Lu C H, Li S B, et al. 100 m/500 Mbps underwater optical wireless communication using an NRZ-OOK modulated 520 nm laser diode[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12171-12181.
- [79] Lu C H, Wang J M, Li S B, et al. 60 m/2.5 Gbps underwater optical wireless communication with NRZ-OOK modulation and digital nonlinear equalization[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2019: SM2G.6.
- [80] Chen H L, Chen X W, Lu J, et al. Toward long-distance underwater wireless optical communication based on a high-sensitivity single photon avalanche diode[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 7902510.
- [81] Chen X, Lü W C, Zhang Z J, et al. 56-m/3.31-Gbps underwater wireless optical communication employing Nyquist single carrier frequency domain equalization with noise prediction [J]. Optics Express, 2020, 28(16): 23784-23795.
- [82] Fei C, Wang Y, Du J, et al. 100-m/3-Gbps underwater wireless optical transmission using a wideband photomultiplier tube (PMT)[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 2326-2337.
- [83] Lee A J, Omatsu T, Pask H M. Direct generation of a first-Stokes vortex laser beam from a self-Raman laser[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12401-12409.
- [84] Lee A J, Zhang C Y, Omatsu T, et al. An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5400-5409.
- [85] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. Optics Communications, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [86] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate [J]. Optics Communications, 1994, 112(5/6): 321-327.
- [87] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. Science, 2017, 358(6365): 896-901.
- [88] Karimi E, Schulz S A, de Leon I, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(5): e167.
- [89] Krishna I V V G, Viswanathan N K. Switchable vector vortex beam generation using an optical fiber[J]. Optics Communications, 2010, 283(6): 861-864.
- [90] Lin J, Yuan X C, Tao S H, et al. Synthesis of multiple collinear helical modes generated by a phase-only element[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(5): 1214-1218.
- [91] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(16): 163905.
- [92] Su T H, Scott R P, Djordjevic S S, et al. Demonstration of free space coherent optical communication using integrated silicon photonic orbital angular momentum devices[J]. Optics Express, 2012, 20(9): 9396-9402.
- [93] Zhao Z, Wang J, Li S H, et al. Metamaterials-based broadband generation of orbital angular momentum carrying vector beams [J]. Optics Letters, 2013, 38(6): 932-934.
- [94] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): B14-B28.
- [95] Wang J. Data information transfer using complex optical fields: a review and perspective (Invited Paper) [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(3): 030005.
- [96] Du J, Wang J. High-dimensional structured light coding/decoding for free-space optical communications free of obstructions[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4827-4830.
- [97] Liu J, Wang J. Polarization-insensitive PAM-4-carrying free-space orbital angular momentum (OAM) communications[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 4258-4269.
- [98] Zhao Y F, Liu J, Li S H, et al. Secure optical interconnects using orbital angular momentum beams multiplexing/multicasting[J]. Advanced Photonics Nexus, 2023, 3(1): 016004.
- [99] Miller J K, Morgan K S, Li W, et al. Underwater optical communication link using polarization division multiplexing and orbital angular momentum multiplexing[C]//OCEANS 2017-Anchorage, September 18-21, 2017, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [100] Zhao Y F, Wang A D, Zhu L, et al. Performance evaluation of underwater optical communications using spatial modes subjected to bubbles and obstructions[J]. Optics Letters, 2017, 42(22): 4699-4702.
- [101] 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.
- [102] Chen Y, Shen W G, Li Z M, et al. Underwater transmission of high-dimensional twisted photons over 55 meters[J]. Photonix, 2020, 1(1): 5.
- [103] 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.
- [104] Cai C K, Zhao Y F, Zhang J Y, et al. Fast auto-alignment underwater wireless optical communications employing orbital angular momentum modes[J]. Optics Continuum, 2022, 1(12): 2590-2599.
- [105] Hei X B, Zhu Q M, Gai L, et al. Photon-counting-based underwater wireless optical communication employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Optics Express, 2023, 31(12): 19990-20004.
- [106] 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.
- [107] Cui X Z, Yin X L, Chang H, et al. Analysis of an adaptive orbital angular momentum shift keying decoder based on machine learning under oceanic turbulence channels[J]. Optics Communications, 2018, 429: 138-143.
- [108] Cui X Z, Yin X L, Chang H, et al. Experimental study of machine-learning-based orbital angular momentum shift keying decoders in optical underwater channels[J]. Optics

- Communications, 2019, 452: 116-123.
- [109] Wang Z Y, Chen M, Wan M Y, et al. Coherent demodulated underwater wireless optical communication system based on convolutional neural network[J]. Optics Communications, 2023, 534: 129316.
- [110] Li S H, Wang J. Adaptive power-controllable orbital angular momentum (OAM) multicasting[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9677.
- [111] Du J, Wang J. Design of on-chip  $N$ -fold orbital angular momentum multicasting using V-shaped antenna array[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9662.
- [112] Zhu L, Wang J. Demonstration of obstruction-free data-carrying  $N$ -fold Bessel modes multicasting from a single Gaussian mode [J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5463-5466.
- [113] Zhu L, Wang J. Simultaneous generation of multiple orbital angular momentum (OAM) modes using a single phase-only element[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26221-26233.
- [114] Li S H, Wang J. Compensation of a distorted  $N$ -fold orbital angular momentum multicasting link using adaptive optics[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1482-1485.
- [115] Jamali M V, Akhoundi F, Salehi J A. Performance characterization of relay-assisted wireless optical CDMA networks in turbulent underwater channel[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6): 4104-4116.
- [116] Jamali M V, Chizari A, Salehi J A. Performance analysis of multi-hop underwater wireless optical communication systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(5): 462-465.
- [117] 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.
- [118] Zhao Y F, Cai C K, Zhang J R, et al. Feedback-enabled adaptive underwater twisted light transmission link utilizing the reflection at the air-water interface[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16102-16112.
- [119] 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.
- [120] Liu W Y, Jin M, Hao Y, et al. Efficient identification of orbital angular momentum modes carried by Bessel Gaussian beams in oceanic turbulence channels using convolutional neural network [J]. Optics Communications, 2021, 498: 127251.
- [121] Robertson E, Pires D G, Dai K J, et al. Constant-envelope modulation of incoherent Gaussian beams for high bandwidth underwater wireless optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(16): 5209-5216.
- [122] Liang Y Z, Su X Z, Cai C K, et al. Adaptive turbulence compensation and fast auto-alignment link for free-space optical communications[J]. Optics Express, 2021, 29(24): 40514-40523.
- [123] Gong L, Zhao Q, Zhang H, et al. Optical orbital-angular-momentum-multiplexed data transmission under high scattering [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 27.

## Underwater Orbital Angular Momentum Optical Communications

Wang Jian<sup>1,2\*</sup>, Wang Zhongyang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>2</sup>Optics Valley Laboratory, Wuhan 430074, Hubei, China

### Abstract

**Significance** The ocean occupies more than 70% of the earth's surface, which has vast area and rich resources. Research and exploration of the ocean have never ended. Due to the complexity and variability of the underwater environment, the ocean has not yet been fully explored and utilized. Further exploration of the underwater environment plays an important role in climate change, oil and gas detection, disaster early-warning, biological research, and other fields. Underwater wireless communication ensures information transmission and interconnection between unmanned devices in the underwater environment during ocean exploration. As the demand for underwater data transmission increases, high-bandwidth and low-latency underwater communication has become a key technology for exploring and utilizing the ocean at a deeper level.

Commonly used carriers for underwater wireless communications include sound waves, electromagnetic waves (e. g. radio frequencies), and light waves. Each of the three carriers has its own characteristics. Although sound waves, as a traditional underwater communication method, have the advantage of a wide transmission range and have been widely used, the problems of relatively narrow bandwidth and longer delay in the medium limit their applications. Electromagnetic waves are difficult to be widely used in underwater environments as they require complicated equipment and short transmission distances. As a new type of underwater communication technology, underwater wireless optical communication has gained widespread attention due to its advantages such as larger transmission bandwidth, better anti-interference ability, lower latency, and lower costs. Underwater wireless optical communication refers to an underwater communication system that uses light waves as the transmission carrier. In recent years, underwater wireless optical communication has made considerable progress in the transmission capacity through the expansion and utilization of multiple physical dimensions of light waves, such as wavelength, time, amplitude, phase, and polarization. However, there are challenges in further improving the transmission capacity. The exploration of the spatial dimension of light waves



has become a feasible way for capacity scaling.

Structured light refers to a special light field that exploits the spatial dimension by tailoring the spatial amplitude, phase, and polarization distribution of light waves to obtain the required characteristics. Especially, structured light with a spiral phase front carrying orbital angular momentum (OAM) has attracted interest in many applications such as optical manipulation, tweezers, sensors, metrology, microscopy, imaging, and quantum science. OAM-carrying structured light appears spatially as an annular intensity distribution due to phase singularity at the beam center. Since OAM-carrying structured light can accommodate multiple orthogonal spatial modes, it has important advantages in expanding the capacity of underwater wireless optical communication. We comprehensively reviewed the advances in underwater OAM optical communications.

**Progress** We first introduced the development history of three types of underwater wireless communication technology, including underwater acoustic communication, underwater electromagnetic (radio frequency) communication, and underwater optical communication, and summarized their respective advantages and disadvantages. Then, we focused on underwater wireless optical communication using OAM modes, with their basic principle, generation, and measurement methods introduced. The research progress of underwater OAM mode wireless optical communication was comprehensively reviewed, including underwater OAM mode encoding and decoding communication, underwater OAM mode multiplexing communication, and underwater OAM mode broadcasting communication. Moreover, OAM mode optical communications involving air-water interface ("water-air-water" crossing air-water medium, total reflection by "air-water" interface) and fast auto-alignment assisted OAM mode optical communications were presented. In addition to the OAM mode, other underwater structured light (e. g. Bessel beam and Ince-Gaussian beam) communications were also introduced. Additionally, complex medium optical communications using OAM modes assisted by adaptive turbulence compensation and fast auto-alignment were presented.

**Conclusions and Prospects** OAM mode exploits the spatial dimension of light waves, providing a new way for the sustainable capacity expansion of underwater wireless optical communication. The future development trend of underwater wireless optical communication is as follows. From the spatial mode point of view, more flexible and powerful spatial light manipulation, a large number of OAM modes, more general structured light accessing the full spatial dimension (spatial amplitude, spatial phase, and spatial polarization), and full use of multiple dimensions are highly desired. From the underwater communication point of view, complex channel modeling, high capacity, long distance, and high robustness are highly expected. Key devices [lasers, modulators, detectors, converters, and (de)multiplexers] and techniques (high speed, high power, high sensitivity, high efficiency, high scalability, and high integration) are of great importance. Meanwhile, from the perspective of future underwater wireless optical communication, on the one hand, it is expected to be combined with electromagnetic (e. g. RF) communication and acoustic communication. According to different application scenarios and different capacity and distance requirements, one or more suitable communication methods and their combinations can be selected. On the other hand, the integration of underwater wireless optical communication technology and underwater perception technology (i. e. integrated communication and perception) is also an important research direction in the future, which is of great significance for improving the development capacity of marine resources, developing the marine economy, protecting the marine ecological environment, and serving the strategy of becoming a powerful marine country.

**Key words** optical communications; underwater wireless optical communications; orbital angular momentum; structured light; spatial dimension; light field manipulation