

激光与光电子学进展

涡旋光束和光子计数在水下光通信中的应用

韦育, 于永河, 黑小兵, 朱启明, 顾永建^{**}, 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 为了提升水下无线光通信性能, 提出在通过涡旋光束的复用提升水下光通信带宽的同时, 采用光子计数探测增加水下光通信支持的衰减长度的方案。通过实验在近岸海水信道中实现了误码率小于前向纠错极限的信息传输, 从而验证了该方案的可行性。并对该系统的性能进行研究, 结果表明, 采用光子计数方案后, 该通信系统发射功率仅为 3.21 nW; 若仅考虑水信道对光的衰减作用, 则将发射功率提高到 1 W, 可使涡旋光束复用的水下光通信支持的衰减长度达到 20.21。该实验为水下光通信提供了一种可以同时提高信息传递速率和衰减长度的方案。

关键词 海洋光学; 水下无线光通信; 涡旋光束; 光子计数; 空间光调制器; 涡旋波片

中图分类号 TN929.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1301001

Application of Vortex Beam and Photon Counting in Underwater Optical Communication

Wei Yu, Yu Yonghe, Hei Xiaobing, Zhu Qiming, Gu Yongjian^{**}, Li Wendong^{*}*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China*

Abstract To improve the performance of underwater wireless optical communication, a scheme is proposed to increase the bandwidth of underwater optical communication through the multiplexing of vortex beams, and at the same time improve the attenuation length supported by the underwater optical communication by using photon-counting detection. The examination results show that information transmission was achieved in the coastal seawater channel with a slight error rate below the forward error correction threshold, thus verifying the feasibility of the scheme. The transmission power of the communication system is only 3.21 nW after the photon-counting scheme is adopted. Considering only the attenuation of light intensity by the water channel, the supported attenuation length reaches 20.21 in the underwater optical communication system with vortex beam when the transmission power is increased to 1 W. This experiment provides a solution for underwater optical communication that can simultaneously increase the information transfer rate and attenuation length.

Key words oceanic optics; underwater wireless optical communication; vortex beam; photon counting; spatial light modulator; vortex wave plate

1 引言

携带轨道角动量(OAM)的涡旋光束是一种横截面光强呈圆环形的光束, 其中心为相位奇点, 波前呈螺旋状^[1]。近年来, 涡旋光束广泛应用于高维量子通信^[2-3]、光通信^[4-8]等领域。由于涡旋光束的轨道角动量具有高维度, 且不同维度间相互正交, 因此涡旋光束近年来也被引入到水下无线光通信中。随着海洋技术的发展, 2016年, Baghdady等^[9]利用螺旋相位片产生与检测涡旋光束, 在2.96 m水信道中实现了通信, 在单

路激光器的直接调制频率为1.5 GHz的情况下, 通过两路涡旋光束的复用实现了3 Gb/s的数据传输速率。同年, Ren等^[10]利用空间光调制器(SLM)产生和探测涡旋光束, 在1.2 m水槽中通过四路涡旋光束复用和10 GHz的激光直接调制, 实现了40 Gb/s的数据传输, 还分析了散射、水流、温度梯度对系统性能的影响。针对实际复杂环境, Wang等^[11]利用空间光调制器产生和探测涡旋光束, 研究了经过水-空气-水介质, 以及受障碍物和气泡影响的涡旋光通信性能^[12]。以上研究表明, 在短距离干扰较小的水信道中, 利用涡旋光束可以

收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-07-30; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(61701464, 61575180)、中央高校基本科研业务费专项(202165008)

通信作者: *liwd@ouc.edu.cn; **yjgu@ouc.edu.cn

进一步提高水下光通信的信息传递速率。

由于海水的强衰减,水下无线光通信的通信距离较短,激光发射功率较大,这成为限制其实际应用的主要因素。为了在更大衰减长度的水信道中实现通信,除了增大光源光强之外,还可以采用高灵敏度的光子计数接收方式,如光电倍增管、雪崩光电二极管等单光子探测器进行接收。Hiskeet 等^[13]、Hu 等^[14]分别验证了开关键控(OOK)和脉冲位置调制(PPM)调制方式下,光子计数接收可以用于水下光通信。然而,对于涡旋光束复用的水下光通信中,尚不清楚是否可以同时利用光子计数接收提升通信支持的衰减长度。

本文在水下涡旋光通信的基础上,采用光子计数方式进行探测,研究基于涡旋光束和光子计数探测的水下光通信系统的性能。实验中,涡旋光束的产生和检测分别采用空间光调制器和涡旋波片。单光子探测器采用集成光子计数模块的光电倍增管,并通过现场可编程逻辑门阵列(FPGA)进行信号处理,实验实现了 1.21 m 近岸海水信道的信息传输,通信带宽为 1 MHz,系统误码率(BER)可小于 10^{-3} 。该实验验证了将涡旋光束复用和光子计数探测技术应用于水下无线光通信中的可行性,为同时实现高速率、长距离水下光通信提供了原理基础。

2 实验装置

图 1 为应用涡旋光束和光子计数搭建的水下光

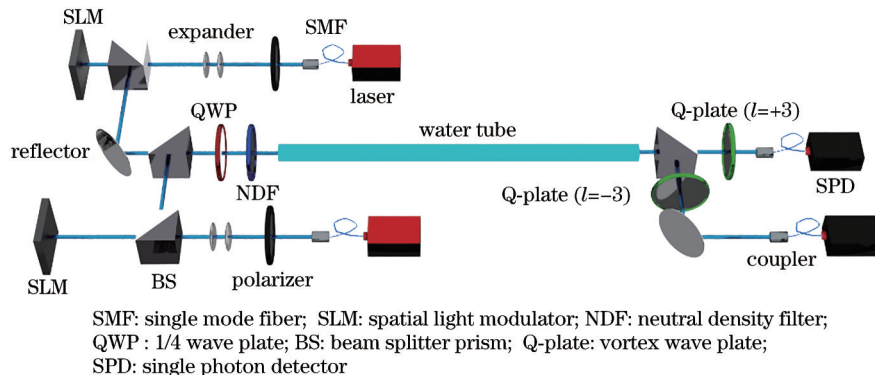


图 1 水下光通信实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of underwater optical communication

2.1 涡旋光束的产生

涡旋光束是一种具有螺旋相位波前的光束。柱坐标系下沿 z 轴传输的涡旋光场可以简化地表示为

$$u(r, \theta, z) = u_0(r, \theta, z) \exp(-i l \theta) \exp(-i k z), \quad (1)$$

式中: θ 表示绕中心轴旋转的方位角; z 为光束传输距离; $u_0(r, \theta, z)$ 表示涡旋光束在传输距离 z 处的复振幅, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长; l 为涡旋光拓扑荷数, 表示波前旋转一周时相位周期变化 2π 的次数。理论上, 拓扑荷数 l 可以取任意实数。

实验上常用螺旋相位片、SLM、全息光栅、涡旋波

片等产生或检测涡旋光束^[15]。本文实验中,采用 SLM 产生涡旋光束,可以充分利用 SLM 加载相位图的灵活性进行涡旋光束产生质量的优化。在 SLM 上加载螺旋相位图,并使平面光束通过 SLM 感光面中心即可生成涡旋光束。拓扑荷数 $l=3$ 的相位图如图 2(a) 所示。为了使获得的涡旋光束质量更好,可以在螺旋相位图上叠加闪耀光栅的相位[图 2(b)],从而得到叉形光栅[图 2(c)]。加载叉形光栅后,实验产生的涡旋光束处于 SLM 出射光束的第一级衍射,如图 3 所示。

通信实验系统示意图,实验中采用了两种涡旋光束的复用。本实验激光器为 Oxxius 公司 LBX-488 型半导体激光器,其波长为 488 nm;单光子探测器为滨松公司 H12386-210 型集成光子计数模块,输出脉冲宽度为 10 ns,暗计数每秒 50 个。两个激光器发出的光束分别经单模光纤模式整形后由光纤准直器输出,确保激光束为 TEM₀₀ 模。偏振棱镜作为起偏器将光束偏振方向调为水平,以满足 SLM 对水平偏振方向光束进行调制的要求。扩束器利用两透镜组成 $2f$ 系统,将光束扩束至光腰直径约 2 mm。SLM 上加载叉形光栅。光束被 SLM 调制后,分别生成拓扑荷数为 +3 和 -3 涡旋光束,并通过分束器(BS)对两光束进行合束。合束后的光束由 1/4 波片将偏振方向转化为左旋圆偏振,中性密度滤光片的作用是控制光束的强度。光束经过内径 4 mm,长度 $L=1.21$ m 的亚克力水管,水管两端为窗口片,水管中装满了青岛近岸海水(海水采样点为经度 120.561996°,纬度 36.1195872°),静置一段时间后,衰减系数 $c=0.54$ m⁻¹。接收端由 BS 将光束等分为两束,并分别通过拓扑荷数为 +3 和 -3 的涡旋波片中心。之后在自由空间中传输一段距离,观察到涡旋光束被转化为中心为一个亮斑,周围有同心光环的形态,用单模光纤和光纤耦合器耦合亮斑中心,并用单光子探测器进行探测。激光器的信号控制和探测器的信号处理均由 FPGA 编程完成。

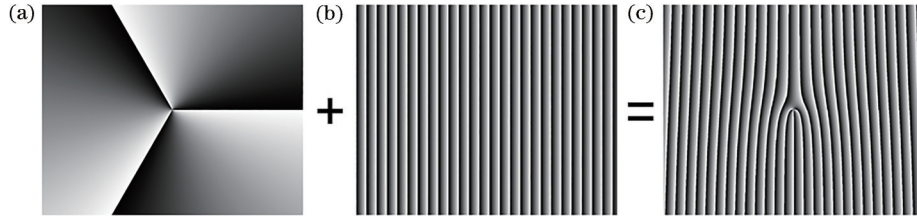


图 2 加载到 SLM 的相位图合成原理。(a)螺旋相位图;(b)闪耀光栅;(c)叉形光栅

Fig. 2 Principle of phase map synthesis loaded into SLM. (a) Spiral phase diagram; (b) blazed grating; (c) fork grating



图 3 SLM 出射的光束图

Fig. 3 Beam emerging from SLM

2.2 涡旋光束检测

本文实验将涡旋波片引入水下光通信中进行涡旋光束的检测,具有高效率、低成本的优点。涡旋波片是一种液晶器件,每一处液晶分子的指向矢与该处方位角 θ 的 q 倍相差固定角度 α_0 , 即

$$\alpha(r, \theta) = q\theta + \alpha_0, \quad (2)$$

式中: α 为液晶分子光轴与 x 轴的夹角; α_0 表示指向矢与 x 轴的初始夹角; $m = 2q$ 是涡旋波片的拓扑荷数,其值为整数。涡旋波片对光场的作用可以表示为琼斯矩阵^[16]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) \\ \sin(2\alpha) & -\cos(2\alpha) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

当入射光为左旋涡旋光束 $E_{in} = E_0 \exp(-i l \theta) \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$

时,出射光束为

$$E_{out} = E_0 \exp[-i(l + 2q)\theta] \exp(-i 2\alpha_0) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (4)$$

仅当 $l = -2q$ 时,该光束为右旋平面光束。通过该原理,可以将涡旋光束转化为具有亮斑中心的平面光束,从而检测入射光的拓扑荷数。经过涡旋波片检测后的光斑形态如图 4 所示,由图 4 可知,涡旋波片能高效地将不同拓扑荷数涡旋光分离开。

2.3 光子计数信号处理

在通信中,为了将单光子探测器输出的脉冲信号转化为正确的信息,需要通过 FPGA 编程对信号进行处理,处理流程如图 5(a) 所示。本实验以带宽 1 MHz 的 OOK 调制方式发送信息。通过个人计算机(PC)将待发送的信息通过 ACSII 码转化为二进制数字信号,经过串口发送给 FPGA, FPGA 将每四个 bit 的字符分为一组,并在每一组待发送数据前加入一个信息头“1”、待发送数据后加入一个信息尾“0”。之后再依次

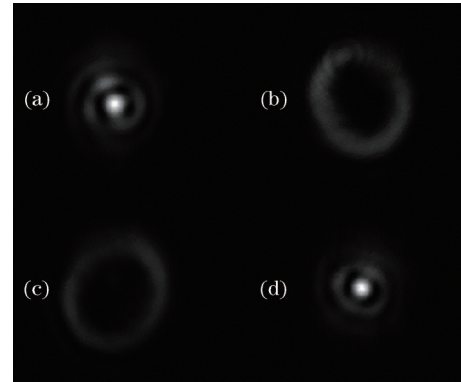


图 4 涡旋波片检测后的光斑形态图。发射端发射拓扑荷数为 +3 涡旋光束,接收端采用 (a) $m = -3$ 和 (b) $m = +3$ 涡旋波片检测;发射端发射拓扑荷数为 -3 涡旋光束,接收端采用 (c) $m = -3$ 和 (d) $m = +3$ 涡旋波片检测

Fig. 4 Spot morphology after vortex wave plate detection. Transmitter emits a vortex beam with topological charge of +3, and the receiver adopts (a) $m = -3$ and (b) $m = +3$ vortex wave plate detection; transmitter emits a vortex beam with topological charge of -3, and the receiver adopts (c) $m = -3$ and (d) $m = +3$ vortex wave plate detection

序将重组后的字符转化为电信号,若字符为“1”,则输出为高电平;若字符为“0”,则输出为低电平,以该电信号经过放大后的信号作为激光器的驱动信号。

在进行通信前,发射端先发射长脉冲,并统计宽度为 1000 ns 区间内的平均计数(简称为平均光子数 n_1),以 n_1 为参考设定一个阈值 n_{th} 。接收信息时,通过检测信息头的位置来定位信息的位置。参考文献[13-14],本文检测信息头位置的方式如图 5(b) 所示。发射端发送的信息头信号长度为 1000 ns,探测器响应后输出一系列宽度为 10 ns 的脉冲。FPGA 连续对宽度为

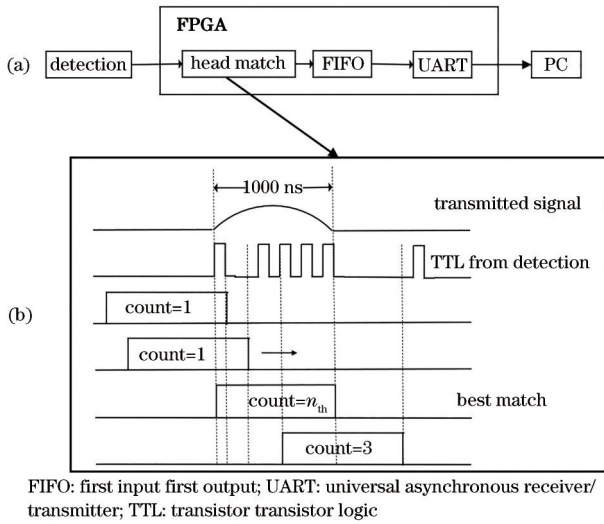


图 5 FPGA 信息处理过程
Fig. 5 FPGA information processing process

1000 ns 区间内的脉冲数进行记录,并且该区间不断地向后移动,每次移动 10 ns,当计数到达预先设定的阈值 n_{th} 时,即认为信息头在该位置。

确定信息头位置后再以同样的判决阈值 n_{th} 判断其后紧接着的 4 个 1000 ns 区间的脉冲数,脉冲数高于判决值 n_{th} 则认为信息是“1”;低于判决值 n_{th} 则认为信息是“0”。这样就完成了一组里 4 个 bit 字符的解码,之后重复以上过程,直至将所有的字符全部解码,解码后的字符实时地通过串口发送到接收端 PC,并转化为 ASCII 码字符信息。实验中通过调节可变中性密度滤光片的旋转角度来改变入射光光强,从而改变接收端平均光子数。

3 结果与讨论

3.1 涡旋光束串扰分析

由于光学器件和信道等因素,涡旋光束经过信道后会产生拓扑荷串扰,即光束能量从一个 OAM 模式分散到其他模式上。在用涡旋光束进行通信时,拓扑荷串扰既会造成能量的损耗,又会造成误码。光通信实验前,对实验系统的拓扑荷串扰进行了实验研究。使用 SLM 调制产生不同拓扑荷数的涡旋光束,经过水信道后用加载不同拓扑荷数相位图的 SLM 进行解调,用单模光纤对解调后的光束第 1 级衍射光进行耦合,并用功率计记录耦合后的光强。实验分别发送拓扑荷数为“0”、“+3”、“-3”、“+6”、“-6”的光束,并在接收端 SLM 上加载这几种拓扑荷数相位图,采用功率计进行探测。实验结果如图 6 所示。由图 6 可知,涡旋光束经过水信道后能量重新分布,大部分能量仍然处于发射的 OAM 模式上,小部分能量分散在其他模式上,与入射光拓扑荷数间隔越小,具有的能量越多。随着发射的光束拓扑荷数绝对值增大,光束模式串扰越来越严重,即发散到其他相邻模式上的光束能量越多,接收

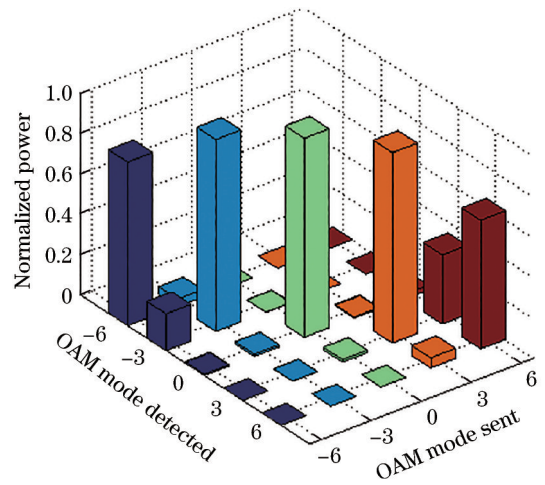


图 6 实验系统的涡旋光束拓扑荷串扰
Fig. 6 Topological charge crosstalk of vortex beams in experimental system

端探测时原发射模式上光功率越低,通信时会造成更多的能量损失,因此拓扑荷数不宜选择过大。另一方面,当拓扑荷数较小时,虽然模式串扰较小,但在多模式应用的光通信中,不同拓扑荷数之间的间隔也会变小,串扰时能量多集中在与原光束模式近邻的光束模式中,使得拓扑荷数间隔较近的光束模式之间串扰增加,进而导致误码增加。综合两方面因素,经过实验测试之后选择 -3 和 +3 两种拓扑荷数的涡旋光束用于双路的水下光通信。

信道串扰是造成通信误码率的关键因素,该实验系统中通道 1 对通道 2 的串扰定义为通道 1 发送信号“1”时,通道 2 的平均光子数与通道 1 平均光子数之比。实验测得两通道串扰率如图 7 所示。由图 7 可知,本实验系统的两通道串扰率均小于 3.5%。理论上来说,在两个通道探测效率相同的条件下,仅改变光强,通道间串扰率应该保持不变,导致图中串扰率变化的原因是环境扰动导致的信号光耦合效率改变。在采用 2.3 节光子计数信号处理方式时,由于设置了阈值 n_{th} ,

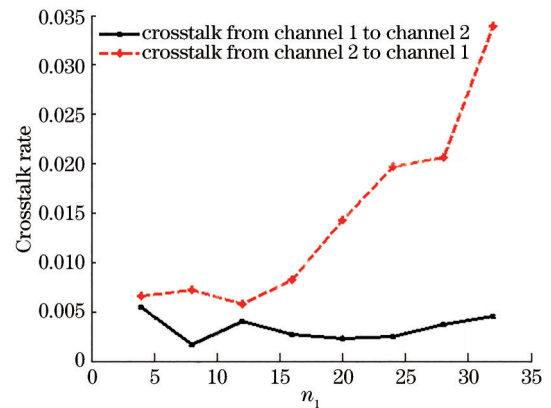


图 7 实验系统的两通道串扰率
Fig. 7 Crosstalk rate between two channels of the experimental system

通道间串扰对通信误码率造成的影响较小。

3.2 通信性能分析

实验系统的信噪比定义为 $R_{\text{SNR}} = n_1/n_0$, 其中 n_0 为发送信息“0”时探测器平均光子计数。实验测得两通道信噪比如图 8 所示。由图 8 可知, 该系统信噪比为 10^5 量级。且信噪比随平均光子数的增加略有上升趋势。

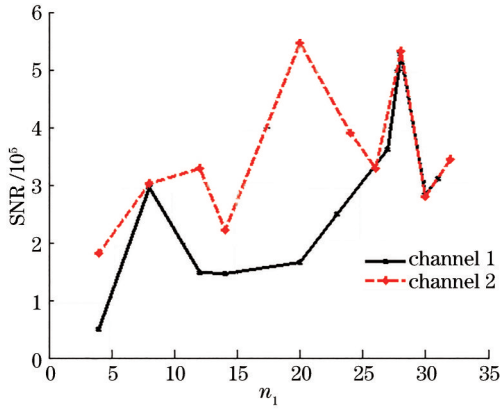


图 8 实验系统的两通道信噪比

Fig. 8 Signal-to-noise ratio between two channels of the experimental system

通信实验的误码率如图 9 所示。其中, 平均光子数与阈值差值定义为 δ , 则阈值 n_{th} 可参照平均光子数 n_1 设定为 $n_{\text{th}} = n_1 - \delta$ 。由图 9 可知, 平均光子数越大, 误码率越低。当平均光子数较小时, 判决值越接近平均光子数, 误码率越低, 但随着平均光子数增大, 当判决值接近平均光子数时误码率反而较大。当 $4 \leq \delta \leq 6$ 时, 实验系统误码率低于前向纠错(FEC)极限, 最低误码率为 3.8×10^{-4} 。产生误码的主要原因是在光子计数探测情况下, 接收端光强较低, 光子数呈泊松分布, 光子数不可避免地会有起伏, 加上涡旋光束光子拓扑荷数的成功解调概率、探测器的探测效率、接收端光强接收效率等因素, 信号光脉冲会有一定概率的丢失, 信息头的位置也有一定概率的判断错误, 从而导致误

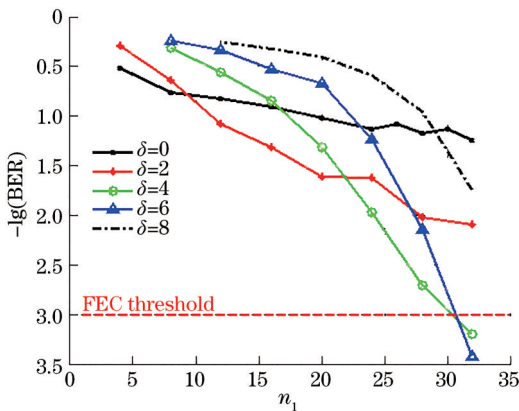


图 9 通信实验的误码率

Fig. 9 Bit error rate of communication experiment

码。此外, 背景光和暗计数也会引起一定的误码。信息头位置判断错误导致的误码可以通过设置更复杂的信息头进行有效降低, 但同时也会因为冗余信息较多, 使得通信速率降低, 这将在后续研究中继续优化改进。

表 1 给出了该通信系统在误码率小于前向纠错极限时的性能参数。其中, 衰减长度 $L_c = c \times L$ 。发射功率 P_t 则通过考虑水衰减 η_w 、接收端光学器件衰减 η_o 、涡旋光光子解调的光纤耦合效率 η_c 、探测器探测效率 η_d 、通信带宽 B 、平均光子计数 n_1 等因素计算得到。该实验系统中, $\eta_w = \exp(-L_c) = 52\%$, $\eta_o = 46.3\%$, $\eta_c = 8.4\%$, $\eta_d = 20\%$ 。

表 1 系统性能参数

Table 1 System performance parameters

Bandwidth /MHz	Modulation	P_t /nW	Bit error rate	L_c
1×2	OOK	3.21	$< 10^{-3}$	0.65

若只考虑水信道中的光衰减对通信信号的影响, 则由光在水中的衰减长度公式 $L_c = \ln(P_t/P_{\text{out}})$ 可知, 在水信道出射功率 P_{out} 取实验中光子计数探测时的出射功率不变化的条件下, 可以通过提高发射功率 P_t 来增加通信支持的 L_c , 不同发射功率下通信系统支持的 L_c 如表 2 所示。

表 2 通信支持的衰减长度

Table 2 Attenuation length supported by communication

P_t /W	10^{-6}	10^{-3}	1
L_c	6.39	13.30	20.21

可以发现, 当发射功率为 1 W 时, 支持的 L_c 达 20.21, 在 Jerlov IB 型海水 ($c=0.144 \text{ m}^{-1}$) 中, 其对应的可通信距离达 140.35 m, 光子计数技术的应用增加了通信系统支持的信道衰减长度。该技术适用于 OOK、PPM 等强度调制的情况, 加上光子计数的技术, 有望用于延长潜航器与水下传感器节点间, 以及传感器节点之间的通信距离。

从图 9 可以看出, 水下无线光通信系统中, 在采用光子计数探测的情况下, 可以通过两种拓扑荷数涡旋光束的复用将信息传递的速率提高一倍。若要进一步提高该系统信息传递速率, 可以利用轨道角动量无穷维及不同维度相互正交的特点, 通过增加涡旋光束维度来实现。涡旋光束和光子计数技术的联合使用, 在增大距离的情况下, 进一步增加了通信的信道容量, 有望进一步提升水下节点间的通信能力。

需要注意的是, 除了水对光的衰减会影响光通信距离外, 水信道存在的多重散射效应和湍流效应也会对涡旋光束的质量产生影响, 从而导致模式串扰增大。由文献[17]可知, 涡旋光束在水信道中传输 55 m 后, 光斑形态已经产生严重的畸变, 此时难以通过将涡旋光束转化为平面光束的方式来对涡旋光束拓扑荷数进

行检测。涡旋光束在水下长距离传输时,如何抵抗水信道的散射、湍流等影响将是以后研究的重点。

4 结 论

本文进行了基于涡旋光束和单光子探测的水下光通信实验,分别采用SLM和涡旋波片产生涡旋光束,采用光子计数探测,利用FPGA编程进行信号处理,应用OOK调制方式在海水信道中实现双通道并行的信息传输,通信系统发射端发射功率仅为3.21 nW。结果表明,涡旋光束和光子计数的应用可以同时提高水下无线光通信的信息传输速率和支持的衰减长度,通过增加涡旋光束维度和提高发射功率,可以进一步提升其性能。本研究为水下无线光通信的性能提升提供了一种新的思路。

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, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, O'Sullivan M N, et al. High-dimensional quantum cryptography with twisted light[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(3): 033033.
- [3] Ji L, Gao J, Yang A L, et al. Towards quantum communications in free-space seawater[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19795-19806.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Krenn M, Fickler R, Fink M, et al. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(11): 113028.
- [7] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [8] 张文定, 李鑫, 白家浩, 等. 光纤结构光场产生及应用[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126003.
Zhang W D, Li X, Bai J H, et al. Generation and application of fiber-based structured light field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126003.
- [9] 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.
- [10] Ren Y, 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Hiskeet P A, Struthers R A, Tatton R, et al. A photon-counting optical communication system for underwater data transfer[C]// *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2012, 8542: 1-16.
- [14] Hu S Q, Mi L, Zhou T H, et al. 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21685-21699.
- [15] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [16] 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.
- [17] Chen Y, Shen W G, Li Z M, et al. Underwater transmission of high-dimensional twisted photons over 55 meters[EB/OL]. (2019-02-04) [2021-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1902.01392>.