

水表面波扰动对无线光通信影响

李军^{1,2}, 罗江华^{2,3}, 元秀华^{1*}¹华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;²长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州 434023;³东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096

摘要 在水下无线光通信(UOWC)中,光传输可能会发生在近水面,此时水表面波扰动对通信性能的影响不可忽视。在实验室环境下搭建了近水面 UOWC 系统,应用风扇控制产生水表面波扰动场景,研究水表面波扰动对通信性能的影响。采用不归零开关键控(NRZ-OOK)调制,研究速率为 500 Mbit/s 的伪随机信号在 10 m 自来水信道传输过程中,输入光强和水表面波扰动对信号误码率(BER)的影响。研究表明:光信号在近水面传输时,系统的 BER 与输入光强的大小密切相关。水表面波扰动对通信质量影响显著,不仅与光传输链路中水表面波扰动的区域范围有关,还与水表面波扰动的深度有关,而且 BER 随扰动的范围和深度呈现某种特定的统计规律。该规律对近水面光链路、水-空链路及空-水链路的无线光通信系统的接收、跟踪和瞄准装置设计与优化具有一定指导意义。

关键词 光通信; 无线光通信; 水下无线光通信; 水表面波扰动; 误码率

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0706005

Influence of Water Surface Wave Disturbance on Wireless Optical Communication

Li Jun^{1,2}, Luo Jianghua^{2,3}, Yuan Xiuhua^{1*}

¹ School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

² School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;

³ National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract In underwater optical wireless communication (UOWC), optical transmission can occur near the water surface. Therefore, the influence of water surface wave disturbance on communication performance cannot be ignored. In this study, a near-surface UOWC system is developed in a laboratory environment. The water surface wave disturbance scene is generated by fan control, and the influence of the water surface wave disturbance on the communication performance is studied. In the experiment, non-return-to-zero on-off keying (NRZ-OOK) modulation is adopted to study the influence of input light intensity and water surface wave disturbance on the bit error rate (BER) of a pseudo-random signal with a rate of 500 Mbit/s transferred in a 10 m tap water channel. The results show that the BER of the system is closely related to the input light intensity when the optical signal is transmitted near the water surface. The water surface wave disturbance has a significant impact on the quality of communication, which is related to the range of the water surface wave disturbance in the optical transmission link and also to the depth of the water surface wave disturbance. Moreover, the BER presents a certain statistical law with the range and depth of the disturbance. This statistical law has a certain guiding significance for receiving, tracking, and aiming devices of the near-water surface optical link, water-air link, and air-water link of a wireless optical communication system.

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-07; 录用日期: 2020-11-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801904)、东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2019D14)

* E-mail: yuanxh@hust.edu.cn

Key words optical communications; wireless optical communication; underwater optical wireless communication; water surface wave disturbance; bit error rate

OCIS codes 060.4510; 010.4450; 010.7060

1 引言

相比传统的水声通信,水下无线光通信(UOWC)能实现更大的调制带宽、更高的传输速率、更好的安全性及更低的时延^[1-3],这使得 UOWC 成为传统水声通信的有力补充,满足了高速和高安全性的应用需求。限制 UOWC 的关键因素是光在传输过程中吸收和散射引起的能量衰减^[4]。早期研究表明,450~550 nm 波段的蓝绿光在水中传播时吸收引起的能量衰减较小,因此目前的 UOWC 系统中多采用蓝绿光作为载波^[5-15]。

引起能量衰减的另一个主要原因是散射效应。在 UOWC 中散射与信道密切相关,不同的信道特性会产生不同的散射效应和通信效果,其中湍流是最重要的影响因素之一^[16-21]。导致水下湍流的因素有很多,比如水的流动、盐度的起伏及温度的变化等,这些都会严重影响 UOWC 链路的可靠性和传输速率^[22-23]。目前,人们进行了大量的理论和实验研究来揭示湍流对通信质量影响的内在机制^[24-27],但研究多集中在水深较大的传输链路方面,这种情况下水表面波扰动的影响通常被忽略。在许多实际应用场景中,光信号传输可能会发生在近水面区域,例如从水下航行器到无人机或水面装置之间的无线光通信,有相当长的一部分通信链路位于水表面,该情况下水表面波的扰动不能忽略。

本文主要研究输入光强和水表面波扰动对通信性能的影响。首先,在实验室环境下搭建了近水面 UOWC 实验系统,通过旋转灰度滤波器调节系统输入光强的大小,应用风扇来控制产生水表面波扰动场景,通过选取的风扇数量表征光传输链路中水表面波扰动的区域范围。然后,采用不归零开关键控(NRZ-OOK)调制,研究速率为 500 Mbit/s 的伪随机信号在 10 m 的自来水信道传输过程中,输入光强和水表面波扰动对信号误码率(BER)的影响。最后,量化分析了传输链路中输入光强的大小、水表面波扰动的范围和深度与通信误码率的关系。结果表明,误码率随输入光强的增大逐渐减小,误码率对水表面波扰动的范围和深度均较为敏感,误码率随扰动范围的增大而近似线性增加,并随水深呈指数规

律衰减。这些特性对近水面光链路、水-空链路、空-水链路的无线光通信系统的接收、跟踪和瞄准装置设计与优化具有一定指导意义,如光学天线中接收机孔径、透镜焦距等参数的选取,跟踪、瞄准装置的控制算法优化等。

2 实验装置

近水面 UOWC 实验系统的框图如图 1 所示。在发射端,对长度为 $2^{16}-1$ 的伪随机码(PRBS)进行 4 倍脉冲整形滤波,以减小系统带宽限制的影响。然后由任意波形发生器(AWG)产生电信号,电信号经尾纤激光器(LDM9LP, THORLABS 公司)偏置与直流电(DC)一起注入到激光源。通过这样的方式,电信号被转换成光信号在水下传输。激光器采用固体散热设计,使它在实验过程中的温度保持不变。发射机是一个带尾纤的激光二极管,波长为 450 nm,它的输出通过一个灰度滤波器来衰减光功率,以达到调节输入信号光强大小的目的。灰度滤波器是机械式的,可以通过手动旋转它到一定的角度来控制。水箱的尺寸为 10 m(长)×0.75 m(宽)×1 m(高),装有自来水,通过测量水箱两端光信号的输入功率和输出功率,并考虑到水箱玻璃的透光率为 0.917,用比尔-朗伯定律计算,得到自来水的衰减系数为 $5.274 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ (波长为 450 nm)。在光穿过路径的顶部,有 3 个用于产生水表面波的风扇,风扇安装在水面上方 5 cm 处,距离发射端 2,5,8 m。这样的布置可以保证水面更均匀地受气流的影响,并能够通过控制开启风扇的数量来量化传输链路水表面波扰动范围的大小。利用凸透镜对通过水下链路传输的光信号进行聚焦,聚光后,利用雪崩光电二极管(APD)模块将接收到的光信号转换成电信号,然后送到示波器进行数据采集和信号处理。实验中所采用 APD 模块(C12702-11, HAMAMATSU 公司)的 3 dB 带宽为 100 MHz,感光灵敏度为 -44.1 dBm。在接收端,对接收的离线数字信号进行非线性均衡处理,该方法可以将接收机的带宽拓宽到 300 MHz,实现对 500 Mbit/s 数据的恢复,具体操作包括数字滤波、同步、均衡、判决及误码率计算。

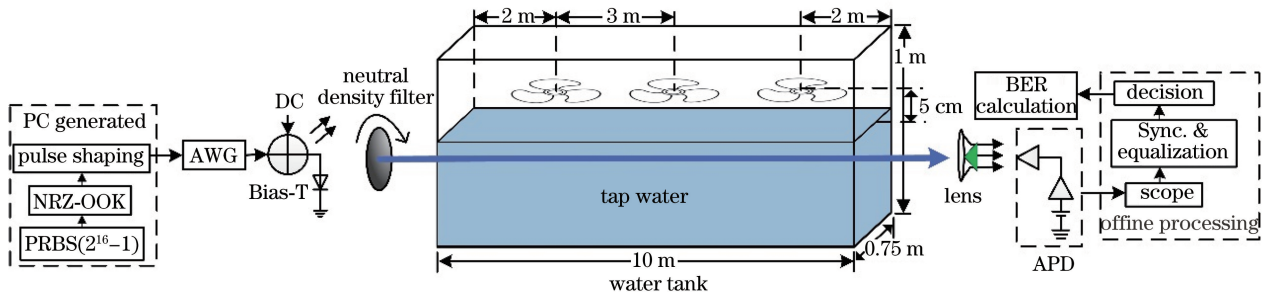


图 1 UOWC 系统的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of UOWC system

3 结果和讨论

前期的研究工作显示,在近水面水下无线光传输过程中,气流所引起的表面水波扰动会引起光斑的散射和光斑像素点质心的严重漂移^[28]。本文将进一步研究表面水波扰动对系统通信质量的影响,并定量分析通信误码率与传输链路的输入光强、水波扰动范围及水深的内在关系。

在实验中,首先让风扇的转速保持恒定,测得风速约为 1.3 m/s,该风速引起的水表面波最大振幅约为 1.2 cm。可以设想,随着风速的增加,水表面波振荡的振幅会增大,扰动所影响的水下通信深度也会进一步增大。在风速为 1.3 m/s 条件下(3 个风扇都开启),测量并计算了不同水深处的闪烁指数,如表 1 所示。

表 1 不同水深处的闪烁指数

Table 1 Scintillation index at different depths of water

Depth of water /cm	2	3	4	5	6	7	8	9	9.5
Scintillation index	1.532	0.9735	0.7851	0.6979	0.3829	0.0892	0.0039	0.0019	1.859×10^{-4}

从表 1 中发现:水表面波扰动影响的最大深度为 9.5 cm;当水深大于 9.5 cm 时,闪烁指数几乎可以忽略不计,属于无湍流,此时水表面波扰动几乎不对系统通信质量产生影响;当水深介于 7 cm 到 9.5 cm 时,闪烁指数远小于 1,属于弱湍流,此时水表面波扰动对系统通信质量会产生一定的影响;当水深介于 3 cm 到 7 cm 时,闪烁指数小于 1,属于中湍流,此时水表面波扰动对系统通信影响较大;当水深小于 3 cm 时,闪烁指数大于 1,属于强湍流。因此将选择影响较大的 3 cm 到 7 cm 的中间值 5 cm 和最大扰动深度 9.5 cm 作为典型深度来进行研究。

输入光强的逐渐增加,系统的误码率会明显减小;在相同水深和输入光强下,开启的风扇数量越多,误码率越大;当系统输入光强大于 $0.976 \mu\text{W}$ 时,4 种情况下的误码率都低于误码率判决门限。在接下来的实验中,将保持输入光强 $1.2 \mu\text{W}$ 不变,以确保系统的误码率在不同水波扰动范围和深度下都能低于判决门限。

3.1 输入光强对通信误码率的影响

首先研究输入光强对通信误码率的影响。通过调整实验系统,发射机和接收机保持在相同的高度,并将光路设于水面以下。设置激光器的驱动电流为 50 mA,以保证激光处于激发态,此时输出功率为 6.8 mW。灰度滤波器固定在激光器和水箱之间,通过调节灰度滤波器来改变水箱输入处的输入光强大小,在水深为 5 cm 处,开启不同数量风扇,在水波扰动下,研究系统的误码率随输入光强的变化规律,结果如图 2 所示。在图 2 中,水平的实线表示误码率的判决门限,大小为 3.8×10^{-3} 。可以看出:随着

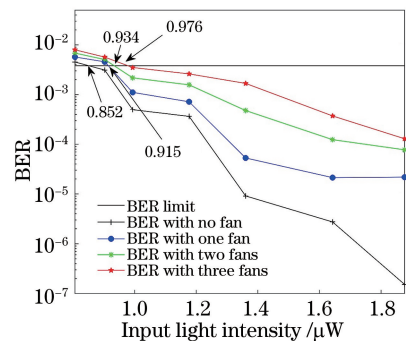


图 2 水深为 5 cm 处,不同水表面波扰动范围影响下系统的误码率与输入光强的关系

Fig. 2 Relationship between BER and input light intensity under the influence of different water surface wave disturbance ranges at the depth of 5 cm

3.2 水表面波扰动范围对通信误码率的影响

保持输入光强 $1.2 \mu\text{W}$ 恒定,研究水表面波扰动

范围对通信误码率的影响。这里利用开启风扇的数量来量化表征传输链路中水表面波扰动范围的大小。

图 3 为水深为 5 cm 处,不同水表面波扰动范围下的误码率。 x 轴为接收端均衡的非线性阶数, y 轴为接收端均衡的存储深度。从图 3 可以看出,随着水表面波扰动范围的增加,BER 的平台有所提高,并且随着非线性阶数和存储深度的变化,BER 的波动变得更加明显。通常对于 500 Mbit/s 的传输系统,BER 的非线性非常明显,人们发现二阶非线性均衡能有效地降低高速传输中码间串扰的影响^[29]。这个实验很好地验证了这一结论,当非线性阶数为 2 时,BER 值平台上出现了一条明显的“沟”。在非线性阶数为 2 和存储深度为 16 时,测量开启风扇数量分别为 0,1,2,3 时的 BER,分别对应

为 5.79×10^{-4} 、 1.43×10^{-3} 、 1.75×10^{-3} 、 2.32×10^{-3} 。可见,通信误码率对水表面波的扰动极其敏感,当出现水表面波时 BER 成倍增长。

对图 3 进行进一步分析,找到不同水表面波扰动范围影响下 BER 的最小值,基于前面的分析,此时非线性阶数仍取 2。图 3(a)中当存储深度为 13 时,BER 达到最小值 5.48×10^{-4} ;图 3(b)中当存储深度为 16 时,BER 达到最小值 1.43×10^{-3} ;图 3(c)中当存储深度为 18 时,BER 达到最小值 1.70×10^{-3} ;图 3(d)中当存储深度为 20 时,BER 达到最小值 1.92×10^{-3} 。可见随着开启风扇数量的增加,存储深度也逐渐增加,这正好说明水表面波扰动范围越大(开启风扇的数量越多),引起的码间串扰越明显。

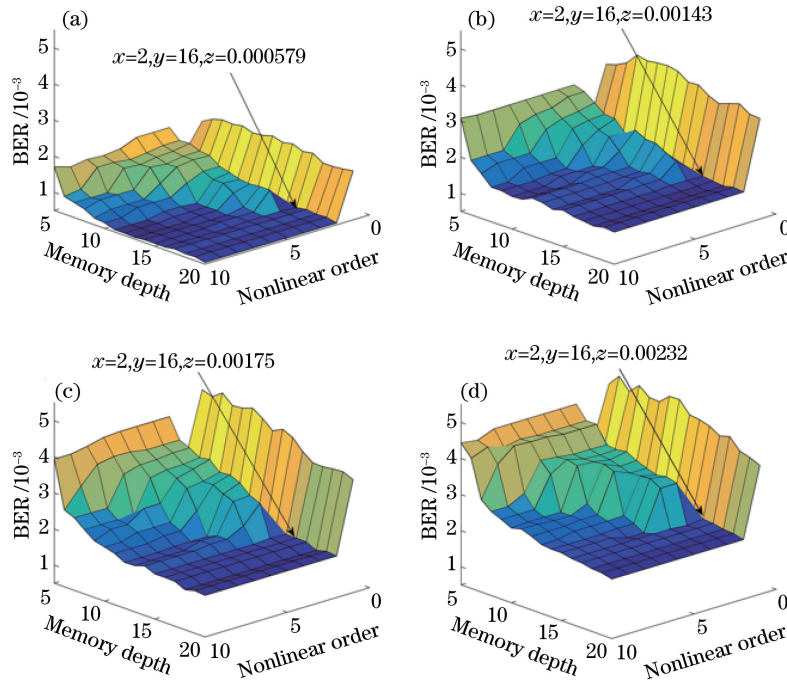


图 3 水深为 5 cm 处的误码率。(a)所有风扇关闭;(b)打开 1 个风扇;(c)打开 2 个风扇;(d)打开 3 个风扇

Fig. 3 BER at the depth of 5 cm. (a) No fan used; (b) one fan used; (c) two fans used; (d) three fans used

通常,水表面波扰动影响和两个因素有关,一是扰动影响的范围(即风扇数量),传输链路受到扰动的范围越大,通信质量越差;二是风扇的风速,风速越大,水表面波振荡的振幅越大,影响到的水下深度也越深。在本次实验中,风扇的风速保持恒定,对于某一确定水深处,水表面波扰动的大小可以通过开启的风扇数量来定量描述。接下来,定量分析通信误码率与开启风扇数量的关系。在水深为 5 cm 处,BER 随开启风扇数量的变化如图 4(a)所示。可以看出,BER 值随水表面波扰动范围的增大近似线性增大,其线性拟合表达式为

$$f(x) = 2.45 \times 10^{-4}x + 1.193 \times 10^{-3}, \quad (1)$$

式中: x 为风扇的数量, $f(x)$ 为误码率。

继续测量水深为 9.5 cm 时,水表面波扰动的影响。当风扇数量为 0,1,2,3 时,测量到 BER 值分别为 5.74×10^{-4} 、 5.76×10^{-4} 、 5.83×10^{-4} 、 5.75×10^{-4} (非线性阶数为 2,存储深度为 16),分布如图 4(b)所示,很明显,曲线近似一条水平直线,而且所测的误码率与水深为 5 cm 处没有水表面波扰动时的值(5.79×10^{-4})相差无几。这里 BER 值的微小起伏可能是 UOWC 系统通信性能的随机起伏导致的,而与水表面波扰动范围的影响无关,也进一步说

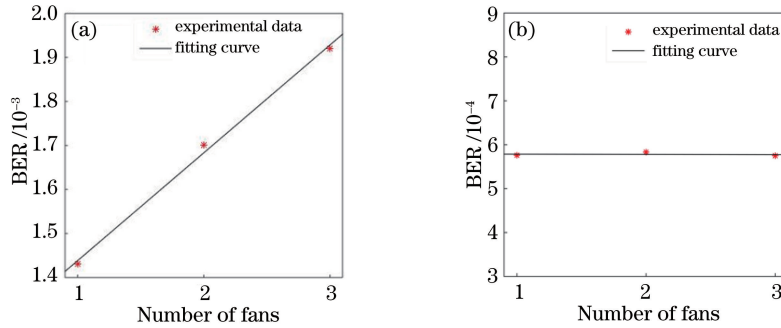


图 4 误码率和水表面波扰动范围的关系。(a)水深为 5 cm 处;(b)水深为 9.5 cm 处
Fig. 4 Relationship between BER and water surface wave disturbance range. (a) At the depth of 5 cm;
(b) at depth of 9.5 cm

明水表面波引起的扰动深度只与风的速度有关而与风影响的范围(UOWC 系统水下链路的区域)无关。

3.3 水表面波扰动深度对通信误码率的影响

接下来进一步研究水表面波扰动深度对通信系统的影响,并量化分析不同水深下的通信误码率。前面的测试发现,当水深大于 9.5 cm 时,水表面波扰动对通信质量几乎没有什么影响,而当水深小于 3 cm 时,水表面波扰动引起的散射效应会导致激光束偏离 APD 的接收区域。这里,测量水深为 3~9.5 cm 时的 BER 值,图 5 为误码率随水深的变化曲线。通过数值拟合发现,在不同数量风扇引起的水波扰动下,通信误码率均随水深呈指数衰减,其衰减关系可以分别表示为

$$f(y) = 4.112 \times 10^{-3} \times e^{-0.2225y}, \quad (2)$$

$$f(y) = 5.841 \times 10^{-3} \times e^{-0.2492y}, \quad (3)$$

$$f(y) = 7.732 \times 10^{-3} \times e^{-0.2955y}, \quad (4)$$

式中: y 为水深, $f(y)$ 为 BER 值。(2)式对应打开图 1 中左侧风扇的情况,(3)式对应打开图 1 中左右两侧风扇的情况,(4)式对应打开图 1 中所有风扇的情况。

此外,从图 5 还可以看出,在传输链路中,水表面波扰动影响的范围越大(即开启的风扇数量越多),相同水深处的误码率值越大,误码率对水深越敏感,即对应的指数衰减函数 $f(y)$ 的衰减系数越大。同时,在水深为 9.5 cm 处,三种情况的误码率值几乎重合,说明该深度下,开启风扇的数量已对误码率没有影响,换言之,在本实验方案下,水表面波扰动影响的最大深度约为 9.5 cm。

前面提到扰动所影响的水下通信的深度取决于风速,接下来研究风速对扰动深度和通信误码率的影响,实验中 3 个风扇都是开启状态。图 6 为不同风速条件下误码率随水深变化的衰减曲线。可以看

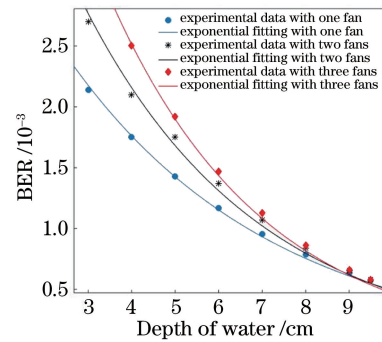


图 5 不同水表面波扰动范围影响下误码率随水深变化的衰减曲线
Fig. 5 Attenuation curve of the BER with water depth under the influence of different water surface wave disturbance ranges

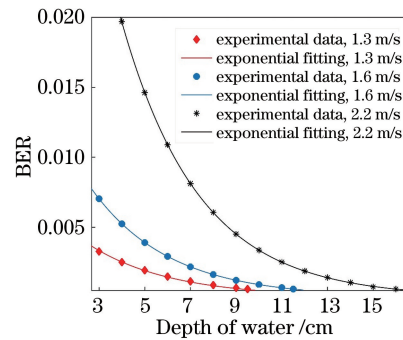


图 6 不同风速条件下误码率随水深变化的衰减曲线
Fig. 6 Attenuation curve of the BER with water depth under different wind speed conditions

出,当风速增加时,最大扰动深度也在增加。当风速为 1.6 m/s 和 2.2 m/s 时,最大扰动深度分别为 11.5 cm 和 16 cm,通信误码率随水深增加也呈指数衰减,其衰减关系可以分别表示为

$$f(z) = 1.698 \times 10^{-2} \times e^{-0.2939z}, \quad (5)$$

$$f(z) = 6.380 \times 10^{-2} \times e^{-0.2945z}, \quad (6)$$

式中: z 为水深, $f(z)$ 为 BER 值。(5)式对应风速为 1.6 m/s 的情况,(6)式对应风速为 2.2 m/s 的

情况。

对比(5)、(6)式发现,在不同的风速条件下,只要水表面波扰动影响的范围一致,其对应的指数衰减函数 $f(z)$ 的衰减系数基本保持不变。随着风速的逐渐增加, $f(z)$ 的幅值逐渐增加。

3.4 眼图

最后,应用眼图宏观地描述了水表面波扰动范

围与深度对近水面 UOWC 系统通信质量的影响。图 7 为不同水表面波扰动范围和水深下的眼图。可以看到:图 7(a)第 1 张眼图非常清晰;随着水表面波扰动范围的增加,图 7(b)第 1 张眼图出现了明显的码间串扰;此外,随着水深的减小,水表面波扰动的影响变得愈来愈明显,图 7(b)第 2 张眼图显得有些模糊,表明码间串扰增大。

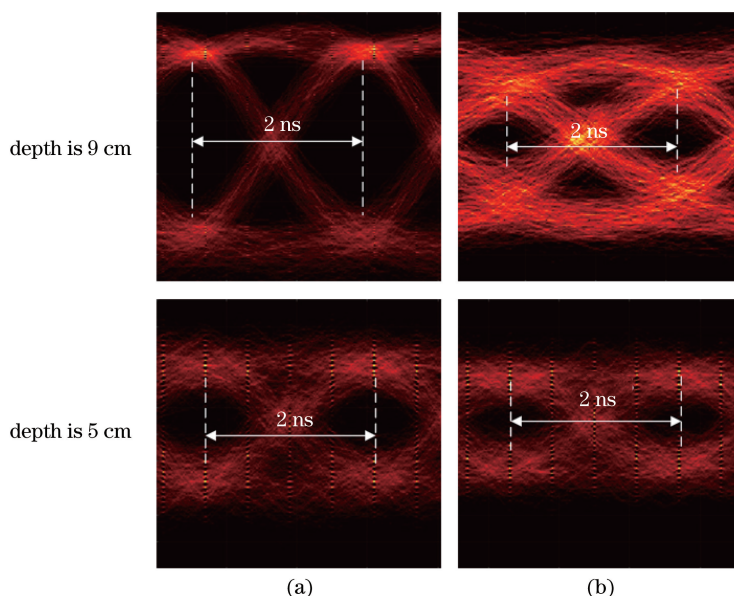


图 7 不同范围水表面波扰动的眼图。(a)使用 1 个风扇;(b)使用 3 个风扇

Fig. 7 Eye diagrams for different range of water surface wave disturbances. (a) One fan used; (b) three fans used

4 结 论

在实验室环境下搭建了近水面水下无线光通信系统,通过控制开启风扇的数量与转速(风速)来模拟不同水表面波扰动的通信场景。首先,定性地分析了开启风扇数量与风速一定的条件下,近水面水下信道的湍流特征;然后,定量地研究了输入光强与水表面波扰动对系统通信误码率的影响;最后,应用眼图验证了实验结果。研究表明:通信误码率会随输入光强的增加而逐渐减小;在输入光强一定的情况下,误码率的大小不仅与光传输链路中水表面波扰动影响的区域范围有关,还与水表面波扰动的深度有关。通过定量分析通信误码率与传输链路中水表面波扰动的范围和深度的内在关系,得到在风速一定时,相同水深链路的误码率随开启风扇数量的增多而近似线性增加,随着水深的增加,误码率会呈指数规律衰减;在开启风扇的数量一定时,风速越大,系统的误码率越大,并且不同风速下的误码率随水深的增加也同样呈指数衰减,但不同风速下误码率随水深的指数衰减系数却几乎不变。这些规律有

助于对近水面无线光通信系统的接收、跟踪和瞄准装置进行设计和优化,并给水下无线光通信系统通信质量的改进提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Ma L, Zhou S L, Qiao G, et al. Superposition coding for downlink underwater acoustic OFDM [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(1): 175-187.
- [2] Goh J H, Shaw A, Al-Shamma'a A I. Underwater wireless communication system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2009, 178: 012029.
- [3] Zhao T F, Wang J, Zhang J, et al. Neighbor discovery method for frogmen cooperation in underwater wireless optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206002.
赵太飞, 王晶, 张杰, 等. 蛙人协作中的水下无线光通信邻居发现方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206002.
- [4] 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.
- [5] Tian P F, Liu X Y, Yi S Y, et al. High-speed underwater optical wireless communication using a blue GaN-based micro-LED [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1193-1201.
- [6] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518-1547.
- [7] 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.
- [8] Wu T C, Chi Y C, Wang H Y, et al. Blue laser diode enables underwater communication at 12.4 Gbps[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40480.
- [9] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J. A long distance underwater visible light communication system with single photon avalanche diode [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-11.
- [10] Dinh D V, Quan Z H, Roycroft B, et al. GHz bandwidth semipolar (112 - 2) InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5752-5755.
- [11] Xu J, Kong M, Lin A, et al. Directly modulated green-light diode-pumped solid-state laser for underwater wireless optical communication [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1664-1667.
- [12] Kong M W, Lv W, Ali T, et al. 10-m 9.51-Gb/s RGB laser diodes-based WDM underwater wireless optical communication[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20829-20834.
- [13] Fei C, Hong X, Zhang G, et al. 16.6 Gbps data rate for underwater wireless optical transmission with single laser diode achieved with discrete multi-tone and post nonlinear equalization[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34060-34069.
- [14] Shen C, Guo Y J, Sun X B, et al. Going beyond 10-meter, Gbit/s underwater optical wireless communication links based on visible lasers[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017.
- [15] Liu X Y, Yi S Y, Liu R, et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser with NRZ-OOK modulation[J]. *Optics Express*, 25(22): 27937-27947.
- [16] Anous N, Abdallah M, Qaraqe K. Performance evaluation for vertical inhomogeneous underwater visible light communications [C] // 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), September 24-27, 2017, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2017.
- [17] Jamali M V, Salehi J A, Akhondi F. Performance studies of underwater wireless optical communication systems with spatial diversity: MIMO scheme [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 1176-1192.
- [18] Elamassie M, Miramirkhani F, Uysal M. Performance characterization of underwater visible light communication [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(1): 543-552.
- [19] Chen Y, Kong M, Ali T, et al. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14760-14765.
- [20] Niu C J, Lu F, Han X E. Propagation properties of Gaussian array beams transmitted in oceanic turbulence simulated by phase screen method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0601004. 牛超君, 卢芳, 韩香娥. 相位屏法模拟高斯阵列光束海洋湍流传输特性 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0601004.
- [21] Sun Y L, Zhang J R, Lu Z Z. Propagation characteristics of Laguerre-Gaussian vortex beams in underwater turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001005. 孙艳玲, 张家瑞, 鲁振中. 拉盖尔-高斯涡旋光束在水下湍流中的传输特性 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001005.
- [22] Vali Z, Gholami A, Ghassemlooy Z, et al. Experimental study of the turbulence effect on underwater optical wireless communications [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8314-8319.
- [23] Huang A P, Tao L W, Wang C, et al. Error performance of underwater wireless optical communications with spatial diversity under turbulence channels [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7600-7608.
- [24] Li Y M, Leeson M S, Li X F. Impulse response modeling for underwater optical wireless channels [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(17): 4815-4823.
- [25] Jamali M V, Akhondi 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.
- [26] Liu W H, Zou D F, Wang P L, et al. Wavelength dependent channel characterization for underwater optical wireless communications [C] // 2014 IEEE International Conference on Signal Processing,

- Communications and Computing (ICSPCC), August 5-8, 2014, Guilin, China. New York: IEEE Press, 2014: 895-899.
- [27] Johnson L J, Green R J, Leeson M S. Underwater optical wireless communications: depth-dependent beam refraction[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 7273-7277.
- [28] Li J, Luo J H, Li S B, et al. Centroid drift of laser beam propagation through a water surface with wave turbulence[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(20): 6210-6217.
- [29] Zhuang B Y, Li C, Wu N, et al. First demonstration of 400 Mb/s PAM4 signal transmission over 10-meter underwater channel using a blue LED and a digital linear pre-equalizer [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California, United States. Washington, DC: OSA, 2017: STh3O.3.