

光束跨波动水空界面传输的表征与验证

张凡¹, 罗江华^{1,2*}, 李军², 林天瑞³, 龚晨³, 徐正元³¹长江大学非常规油气省部共建协同创新中心, 长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州 434023;²中山市中创光电产业技术研究院, 广东 中山 528415;³中国科学院无线光通信重点实验室, 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027

摘要 在跨水空界面可见光通信(W2A-VLC)中,动态水面波浪会导致光束折射、接收到的光信号强度随机波动。本文重点研究规则波浪和随机波浪对光无线传输的影响,采用实验与理论仿真相结合的方法,研究跨波动水空界面的可见光传输,分析光信号传输的物理响应及其链路性能。先通过实验测试激光二极管(LD)窄光束传输,获得接收端光斑的统计特性,然后将其与蒙特卡罗仿真结果进行对比,结果发现规则波浪和随机波浪引起的光子能量分布的统计规律不同。接着从发光二极管(LED)宽光束传输的角度验证LD的传输特性,即将LED视为窄光束的集成,进行仿真和真实的W2A-VLC实验验证;仿真结果与实验结果一致,从而从宽光束角度证明了窄光束的统计规律。

关键词 光通信; 规则波浪; 随机波浪; 蒙特卡罗仿真; 窄光束; 宽光束

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221266

1 引言

为了探索和开发海洋资源,需要在水下平台和空中平台之间构建无线网络^[1-4]。在这些无线网络中,数据需要穿过水空(water-to-air, W2A)界面进行高效传输,因此,可靠的W2A无线通信链路发挥着极其重要的作用^[5-6]。声波、射频波和光波可以作为无线载波在水和空气中传输信息。由于传播距离长(可达数千米),声波一直是水中通信的首选,但它在穿越水面时大部分会被反射掉。此外,声通信系统的传输速率相对较低(在kb/s量级),限制了它的应用^[7]。射频波适合在大气中远距离(可达几十千米)、高速(可达数百Mb/s)无线通信,但受到水的高吸收和衰减影响,在水中只能传播数米^[8]。研究显示,在450~550 nm波长之间的海水吸收光谱中存在一个低损耗窗口,这表明蓝绿波段的光波能够有效应用于水下无线通信^[9-11]。综合比较而言,光波能同时在水、空两种介质中实现较长距离的无线传输,而且光波具有大带宽、高传输速率、低延迟、收发端器件成熟等优点,这意味着光波可以作为跨水空界面无线通信的潜在解决方案^[12-16]。

要实现可靠的W2A光无线通信(OWC),动态波动的水空界面是一个挑战。海浪通常是由风、浪涌、潮汐等引起的,且不可预测。这种动态波动将导致传播的光信号随机折射,进而降低信道的可靠性。近年来,

国内外从理论和实验两方面对W2A-OWC进行了研究^[17-23];Nabavi等^[20]针对不同湍流水面条件下的W2A-OWC信道建立了一个脉冲响应的经验模型;Islam等^[21]提出使用多个光源的波束整形来抵消水面波动的影响;Di等^[22]设计了波束跟踪系统,用于减轻波浪引起的通信性能衰落;为了降低系统的复杂度,Shao等^[23]提出了一种多载波W2A激光通信方案,并解决了文献[24]中所述的衰落效应。上述工作针对一些预先对准的W2A-OWC链路,通过技术方案和巧妙设计降低了水面波动造成的不利影响。但在实际的海洋环境中,发射器和接收器很难预先完美对准,稳健的链路设计应参考信号光跨水空界面的传输特征^[25]。光束穿过水空界面时,水面波浪的随机动态起伏会导致光束中光子的传播出现不可预测的路径偏差。因此,需要获取光子在不同水空界面下物理响应的统计特性,以此来表征光束的传输特征。然而,目前尚缺乏对光束跨波动水空界面传输及其光子响应特性的有效表征,也缺乏对不同水空界面模型的实验验证。

本文研究了两种动态波浪对光子传输链路的影响。先通过激光二极管(LD)窄光束传输实验测试,在接收端提取激光光斑的质心信息,获得两种动态波浪下光子的传输响应,并与理论仿真结果进行对比分析;接着对实验数据进行数值拟合分析,进一步获得光子响应的统计特性及其内在动力学特征;最后通过理论

收稿日期: 2022-09-23; 修回日期: 2022-10-19; 录用日期: 2022-11-15; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801904)、国家自然科学基金(62171428)、长江大学非常规油气省部共建协同创新中心开放基金(UOG2022-07)

通信作者: *jhuo_09@foxmail.com

仿真结合可见光通信链路实验,从发光二极管(LED)宽光束传输的角度验证窄光束的结果。

2 窄光束漂移与光子响应

首先根据不同波浪场景下 LD 窄光束传输的真实实验测试,在接收端获取激光光斑光子分布的全部信息;接着利用已有理论对两种不同的动态波浪建模,用理论和实验相互验证;最后分析光束漂移的动力学过程,结合实验数据定量给出光子响应的统计特性。

2.1 实验测试

光子传输的实验测试方案如图 1 所示,利用光子在接收端的空间分布表征光子的物理响应。实验中,发射机为窄光束 LD 激光器(HMSfSYmR4x,波长为 532 nm),其输出光束垂直向上,经过光衰减后在深约为 40 cm 的水中传输,然后穿过水空界面到达水面上约 45 cm 处的接收端,此时激光束在水和空气中的传输距离比接近 1:1。衰减光功率的目的是避免高速相机因过度曝光而出现黑点。在接收端,高速相机(HAMAMATSU,C11440-52U,50 frame/s)用来捕捉激光光斑,其有效像素数为 2048 pixel×2048 pixel,有效区域在 13.312 mm×13.312 mm 内,总连续采样帧数设置为 1000,采样时间和连续采样时间间隔分别设置为 2 ms 和 18 ms。水面上方的风扇用于产生规则波,随机波则由固定在水面下方的造浪器产生。风扇产生的规则波形状类似于余弦波,波高约 2.2 cm;造浪器产生的随机波浪由很多碎波组成,波高和波长大小不一。

实验采用 LD 窄光束进行传输测试,这是因为 LD 激光光束的发散角和直径均很小,接收端的高速相机能够捕获到整个光斑的像素分布信息,从而更准确地反映光子传输响应与动态波动水面之间的内在关联。

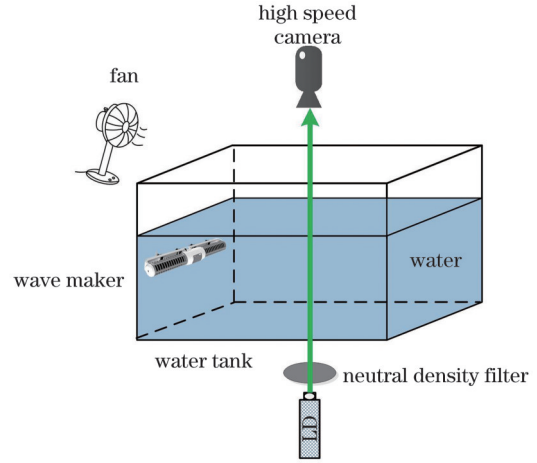


图 1 光子响应实验测试方案

Fig. 1 Schematic of photon response test experiment

图 2 为高速相机随机采集的激光光斑。图 2(a)、(b)、(c)分别是平静水面、规则波浪和随机波浪三种场景下采集的激光光斑。如图 2(a)所示,平静水面下接收端高速相机采集的激光光斑呈现出与发射端相同的圆形结构。当风扇运转时,其所形成的规则波浪使激光光斑沿风向呈现为长条状,如图 2(b)所示。如图 2(c)所示,造浪器产生的随机波浪使得激光光斑的形状呈不规则分布。

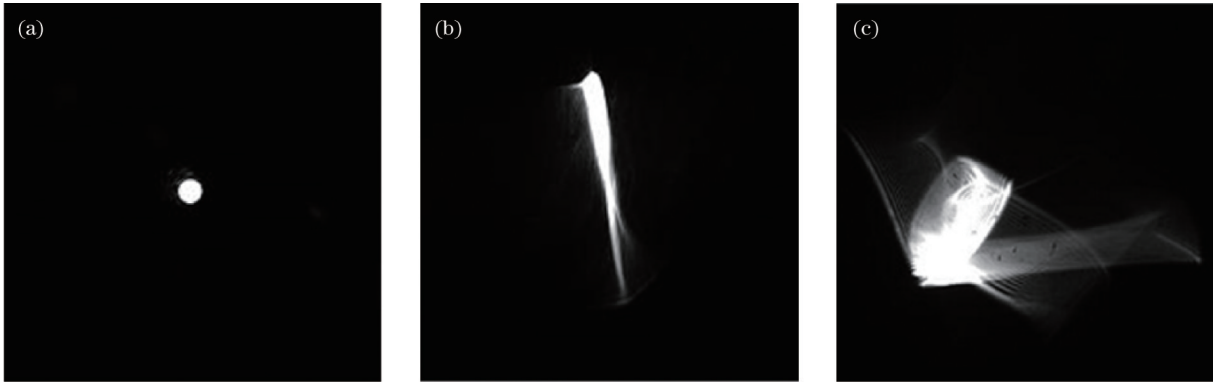


图 2 不同条件下随机采集的激光光斑。(a)平静水面;(b)规则波浪;(c)随机波浪

Fig. 2 Randomly sampled laser spots under different conditions. (a) Calm water surface; (b) regular waves; (c) random waves

2.2 实验结果及仿真分析

为了更好地理解图 2 所示接收端的光斑特征,对光子传输进行蒙特卡罗数值仿真分析,采用 MATLAB 软件进行数值模拟计算,详细的理论计算过程可以参考文献[17]。由于海浪可能是由风、潮、浪等诸多因素引起的,很难找到一个函数来准确拟合海面波浪。这里讨论两种波浪,其中的一种被认为是由相对稳定的外力(比如稳定的风)触发的,称为规则波。这类波具有相对单一的幅度、方向和频率分量,可以用

斯托克斯波理论^[26]表示为

$$z(x, t) = \alpha \left\{ \left[1 - \frac{1}{16} (k \cdot \alpha)^2 \right] \cos \theta + \frac{1}{2} (k \cdot \alpha) \cos(2\theta) + \frac{3}{8} (k \cdot \alpha)^2 \cos(3\theta) \right\} + O[(k \cdot \alpha)^4], \quad (1)$$

$$\theta(x, t) = kx - \omega t, k = \frac{2\pi}{\lambda}, H = 2\alpha \left[1 + \frac{3}{8} (k \cdot \alpha)^2 \right], \quad (2)$$

式中: H 代表波高; $k \cdot \alpha$ 表示波陡程度; λ 表示波长; ω 表示角频率; t 表示时间; $O(\cdot)$ 表示无穷级数; k 表示波数; α 表示振幅。 $k \cdot \alpha$ 值越大, 波峰越陡, 波谷越平坦。这里需要说明的是, 虽然实验室测试的水深较浅, 风扇所产生的规则波的波浪较小, 但实验能够满足水深大于波浪波长的条件。另外, 实验中风扇所产生的规则波的波形与仿真中由斯托克斯理论构建的斯托克斯波形相似, 均具有波峰陡、波谷平坦的类似余弦波形的空间轮廓。从光束传输的角度看, 这两种具有相似空间分布轮廓的波形对穿过光线的空间调制特性的影响也是相似的。另一种波浪被认为是由多种复杂或不稳定因素引起的, 称为随机波。随机波的波面形状具有不规则的空间分布结构, 波形中包含许多波高、波长各不相同且随机排布的空间成分。这类波可以看作是由多个不同幅度、频率和方向的余弦波组成的, 可以用双叠加模型(DSM)^[27-28]表示为

$$z(x, y, t) =$$

$$\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N a_{ij} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \epsilon_{ij}), \quad (3)$$

$$\omega_i^2 = gk_i \tanh(k_i d), \quad (4)$$

$$a_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j)} d\omega_i d\theta_j, \quad (5)$$

式中: z 表示 t 时刻点 (x, y) 处的海面高度; a_{ij} 表示振幅; ω_i 表示角频率; k_i 表示第 i 个波数; θ_j 表示方向角; ϵ_{ij} 表示初始相位; g 是重力加速度; d 是水深; $S(\omega_i, \theta_j)$ 定义为方向谱。方向谱 $S(\omega, \theta) = S(\omega)\varphi(\theta)$, 其中: $S(\omega)$ 为波的频谱, 可采用 Semi-empirically Neumann 谱描述; $\varphi(\theta)$ 是波能的扩散函数。它们的表达式分别为

$$S(\omega) = C \frac{\pi}{4} \frac{1}{\omega^6} \exp\left(-\frac{2g^2}{U^2 \omega^2}\right), \quad (6)$$

$$\varphi(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta, \quad (7)$$

式中: C 为常数因子, $C=3.05 \text{ m/s}^2$; U 表示风速的大小。

在 LD 窄光束蒙特卡罗仿真中, 设置激光波长为 532 nm, 发散角趋近于零, 光子发射的初始坐标为 $(0, 0, 0)$, LD 在初始坐标位置朝垂直向上的同一方向发射一定数量的光子, 此时 LD 可以看作是一个窄光束发射点。发射端在水面以下 10 m 处, 接收端在水面以上 10 m 处, 水上、水下距离比例与图 2 所示实验接近。仿真时采用的是清澈海水条件, 吸收系数取 0.114, 散射系数取 0.0374。对于规则波浪, $k \cdot \alpha = 0.15$, 波高取 0.38 m; 对于随机波浪, 风速 U 取 4 m/s。通过计算信道中光子在连续散射点间的轨迹演化, 可以获得光子传输的物理响应, 如图 3 所示。如图 3(a) 所示, 在平静水面条件下, 光子主要分布在接收端坐标中心的周围, 且呈圆形分布, 与入射光斑形状一致。如图 3(b) 所示, 在规则波浪下, 接收端光子呈条状分布。如图 3(c) 所示, 在随机波浪下, 接收端光子从中心向外围扩散, 光子分布范围显著增加。图 3(b) 和图 3(c) 中光子分布的差异性说明光子在规则波和随机波调制下的运动轨迹完全不同。规则波由稳定的外力驱动, 其幅值、方向以及频率分量相对单一, 这种稳定的空间调制效应使接收端光子分布具有相对稳定的空间结构; 而随机波由不稳定因素引起, 含多个不同的幅度、方向和频率分量, 其对传输光子的空间调制亦不稳定。

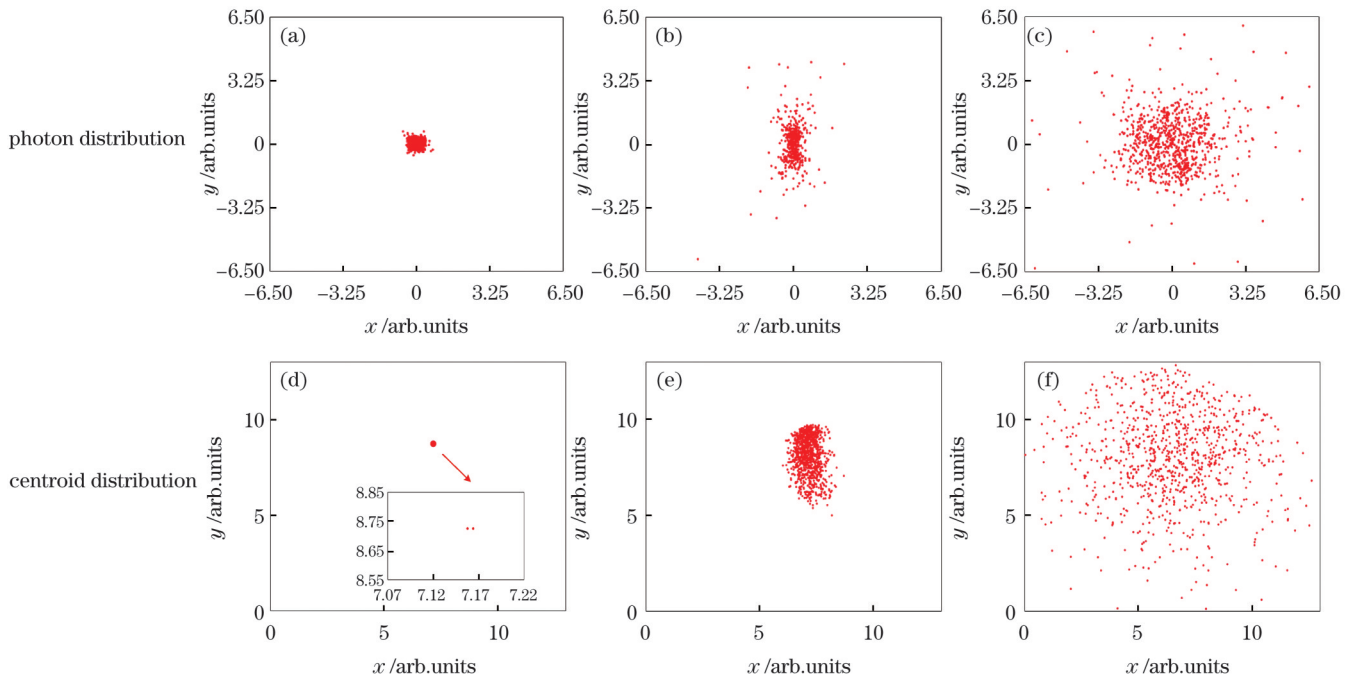


图 3 蒙特卡罗仿真得到的光子分布以及实验测试得到的激光光斑质心分布。(a)(d) 平静水面; (b)(e) 规则波浪; (c)(f) 随机波浪
Fig. 3 Photon distributions obtained by Monte Carlo simulation and experimental laser spot centroid distributions. (a)(d) Calm water surface; (b)(e) regular waves; (c)(f) random waves

因此,图 3(b)中的光子沿风向呈条状分布,而图 3(c)中的光子分布具有由中心向外围扩散的特征,结构比较混乱。

为了验证图 3(a)~(c)所示的仿真结果,对图 2 所示实验中的 1000 个连续采样点进行详细分析,对比研究不同场景下的光子响应和光束漂移。将 x 轴定义为垂直于风的方向,将 y 轴定义为风的方向,将接收端 1000 个连续采样光斑的质心按照坐标进行提取,用于表征光子响应的空间分布,质心定位的像素坐标表示方法可参考文献[29]。图 3(d)~(f)分别给出了平静水面、规则波浪和随机波浪下激光光斑的质心分布。在图 3(d)中只能看到两个点,说明大量的质心像素点相互重合。重叠点越多,意味着激光光束的漂移越小,可以观察到的点数也越少。在图 3(e)和图 3(f)中,由于水空界面的波动,质心点数迅速增加。在图 3(e)中,质心沿 y 轴的分布范围明显大于沿 x 轴的分布范围,其空间分布呈清晰的长条状。在图 3(f)中,质心点由中心向外围各个方向扩散,且沿 x 、 y 方向的分布无明显差异。图 3(d)~(f)所示的实验结果与图 3(a)~(c)所示仿真得到的接收端光子分布的总体形状与规律基本相同。

2.3 统计特征

图 3 所示仿真与实验结果定性给出了规则波浪与随机波浪的空间调制差异。接下来,进一步对

图 3(e)和图 3(f)所示的实验数据进行定量分析,以获取规则波与随机波空间调制下光子响应的统计特性。图 4(a)和图 4(b)分别对应规则波下图 3(e)中 x 轴和 y 轴上的质心分布,图 4(c)和图 4(d)分别对应随机波下图 3(f)中 x 轴和 y 轴上的质心分布。对图 4 中的质心点进行统计曲线拟合,拟合结果如图 4 中的黑色实线所示。可以看到:图 4(a)所示 x 轴上的质心点符合高斯曲线拟合,曲线峰值的位置正好位于数据点分布的中心,而且两侧质心点的权重几乎相同,服从正态分布特征;图 4(b)所示 y 轴上的质心拟合曲线的峰值偏向 y 轴的右侧,右半部分的曲线比正态分布的曲线更陡峭,而左半部分的曲线更平坦,呈现出拖尾状,符合负偏态分布特征,偏态参数 $\lambda' = -2.5$ 。图 4(a)和图 4(b)所示统计特性的差异可以解释为:产生规则波浪的风力沿 y 轴, y 方向的平衡被打破,因此该方向的质心点不再呈正态分布。此外,对比图 4(b)和图 3(e)还可以发现,规则波浪下的光子扩散和光束漂移主要沿着风向,即 y 轴负方向。对于造浪器产生的随机波浪,其各个方向的外力权重无明显差异,从而造成了图 4(c)和图 4(d)所示的质心点的杂乱无章分布。尽管如此,在随机波浪下, x 轴和 y 轴方向上接收端光斑的质心点仍然呈现出近似正态分布的统计特征。图 4(a)~(d)中拟合曲线的数学表达式分别为

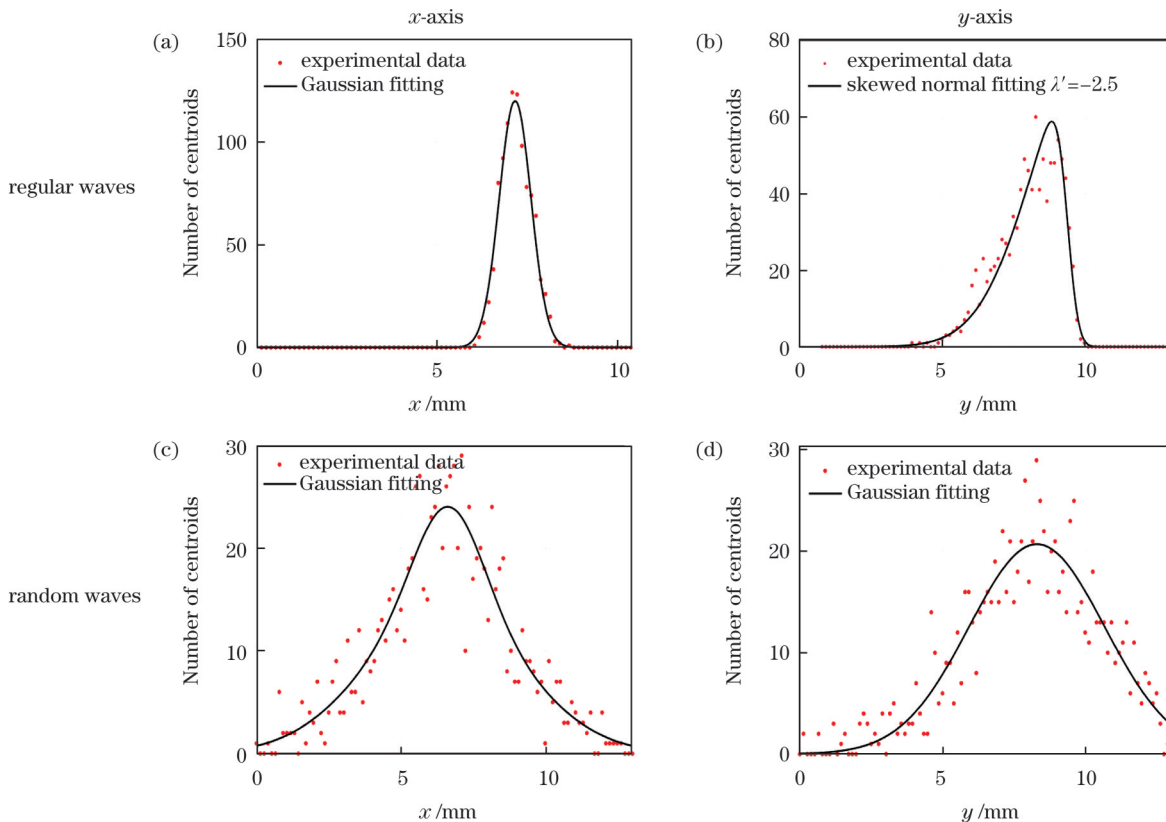


图 4 规则波浪和随机波浪下, x 轴和 y 轴上的质心分布与拟合曲线

Fig. 4 Centroid points distributions and fitting curves on x - and y -axis under regular and random waves

$$f(x_d) = 119.90 \exp \left[- \left(\frac{x_d - 7.17}{0.62} \right)^2 \right], \quad (8)$$

$$f(y_d) = 149.72 \phi \left(\frac{y_d - 7.89}{1.63} \right) \Phi \left(-2.5 \frac{y_d - 7.89}{1.63} \right), \quad (9)$$

$$f(x_d) = 24.02 \exp \left[- \left(\frac{x_d - 6.60}{3.40} \right)^2 \right], \quad (10)$$

$$f(y_d) = 20.72 \exp \left[- \left(\frac{y_d - 8.29}{3.35} \right)^2 \right], \quad (11)$$

式中: x_d 和 y_d 分别表示 x 轴和 y 轴上质心点漂移的距离; $f(x_d)$ 和 $f(y_d)$ 分别为对应的质心点个数; $\phi(y_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{y_d^2}{2} \right)$; $\Phi(y_d) = \int_{-\infty}^{y_d} \phi(\beta) d\beta$ 。

3 宽光束验证

这一部分将 LED 宽光束传输仿真与真实的跨空界面可见光通信(W2A-VLC)实验相结合来证明窄光束 LD 链路表征的合理性。

3.1 光子响应仿真

在窄光束激光的仿真模型中,由于 LD 的发散角趋于零,可以将其看成是沿着一个方向发射光子的窄束发射点。在宽光束模型中,LED 的发散角较大,可以将 LED 看成是在发散角内同时沿不同方向发射的多条窄束。因此,从光束的传输角度来讲,宽光束 LED 可以看成是沿不同方向发射光子的多个窄束 LD

点组成的光源。在宽光束蒙特卡罗仿真链路中,设置 LED 的波长为 532 nm,发散角为 40° ,光子发射的初始坐标为 $(0,0,0)$ 。在仿真中,LED 在初始坐标位置和发散角范围内随机地朝各个方向发射足够数量的光子,此时任意一个确定方向上会有一些数量的光子发射,相当于该方向对应一个窄束 LD 发射点,通过计算不同方向上的窄束激光传输,就能将窄束激光的仿真模型拓展到宽光束的 LED 仿真中。发射端在水面以下 5 m 处,接收端在水面以上 15 m 处,光在水下、水上的传输距离之比为 1:3。水体的吸收与散射系数、规则波浪和随机波浪的模型参数与上述 LD 仿真参数一致。在 LED 宽光束仿真中,通过计算链路增益得到接收端光斑的能量分布,并以此表征光子响应。设每个光子发射前的权重为 1,光子在传输中会经历吸收、散射、反射和折射等,在到达接收端之前,光子的权重将逐渐减小。将空间某点的链路增益值定义为该点成功接收光子的总权重与发射光子总数的比值^[17]。仿真结果如图 5 所示。如图 5(a)所示,平静水面下接收端的光斑为规则圆形,亮度从中心向四周逐渐减弱。如图 5(b)所示,在规则波浪的影响下,光斑变为椭圆形,与平静水面下的光斑相比略有拉长,而且光斑在负 y 方向的亮度明显高于正 y 方向,表明规则波浪引起了光斑能量的定向漂移。如图 5(c)所示,随机波浪影响下的光斑仍然呈现为圆形轮廓,但光斑内各处的亮度分布不均匀,且具有一定的随机性。图 5 所示的光斑特征与图 3 所示的光子分布大体相似,也基本遵循图 4 所示的统计规律。

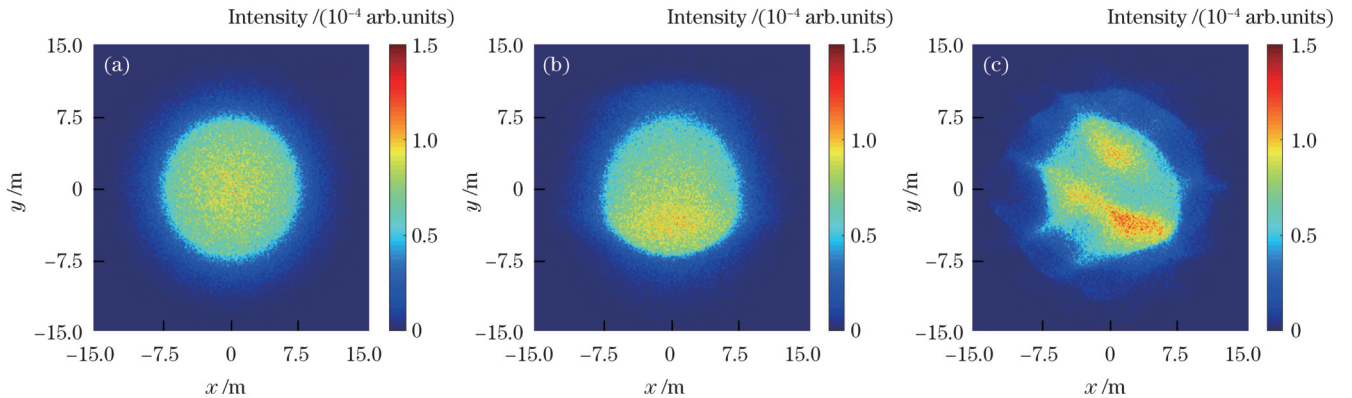


图 5 不同条件下 LED 仿真链路接收端的光斑。(a)平静水面;(b)规则波浪;(c)随机波浪

Fig. 5 Spots collected at LED simulation links receiver end under different conditions. (a) Calm water surface; (b) regular waves; (c) random waves

3.2 实验验证和分析

图 6 为 LED W2A-VLC 实验链路验证系统,该系统由发射装置、水空信道和接收装置组成。发射装置是一个由任意波形发生器(AWG)驱动的 LED,调制后的 LED 光束通过水空信道到达接收端,接收端的雪崩光电二极管(APD)检测光信号并将其转换为电

信号,电信号由数据采集卡采样并下载到终端计算机进行处理。在发射端,一个绿光 LED (Cree, XBDGRN, 520~535 nm) 被封装在位于水下 16 cm 位置处的丙烯酸容器中。LED 上方放置一块透镜,以改变光束的发散角。本实验中的发散角约为 43.6° 。LED 通过防水电缆连接到 AWG (Rigol DG5252),

AWG 同时输出 2.8 V 直流偏置电压和正弦波 (50 kHz, $V_p=1$ V)。在接收端设计了一个圆盘装置, 如图 6(a) 所示, 圆盘位于水面上方 42 cm 处, 此时 LED 光束在水、空中的传输距离比接近 1:3。圆盘装置结构详见图 6(b), 圆盘以光斑中心为原点, 在 8 个方向上共设置 25 个接收点。接收点的位置关系描述如下: APD (Hamamatsu C10508-01) 在光斑内部 [包括接收点 0 (即光斑中心) 与位置 1, 位置 1 距光斑中心

15 cm], APD 在光斑边缘 (位置 2, 距离光斑中心 30 cm) 或在光斑外部 (位置 3, 距离光斑中心 40 cm)。上述位置关系是基于平静水面确定的, 根据各实验参数可以计算出接收端光斑半径约为 30 cm, 即光斑正好在位置 2 内。W2A-VLC 实验平台如图 6(c) 所示, 其中 APD 的输出由数据采集卡 (ART Technology USB3103 A, 500 kSa/s) 完成, 在三种场景下对 25 个接收点进行连续 60 s 数据采样^[25]。

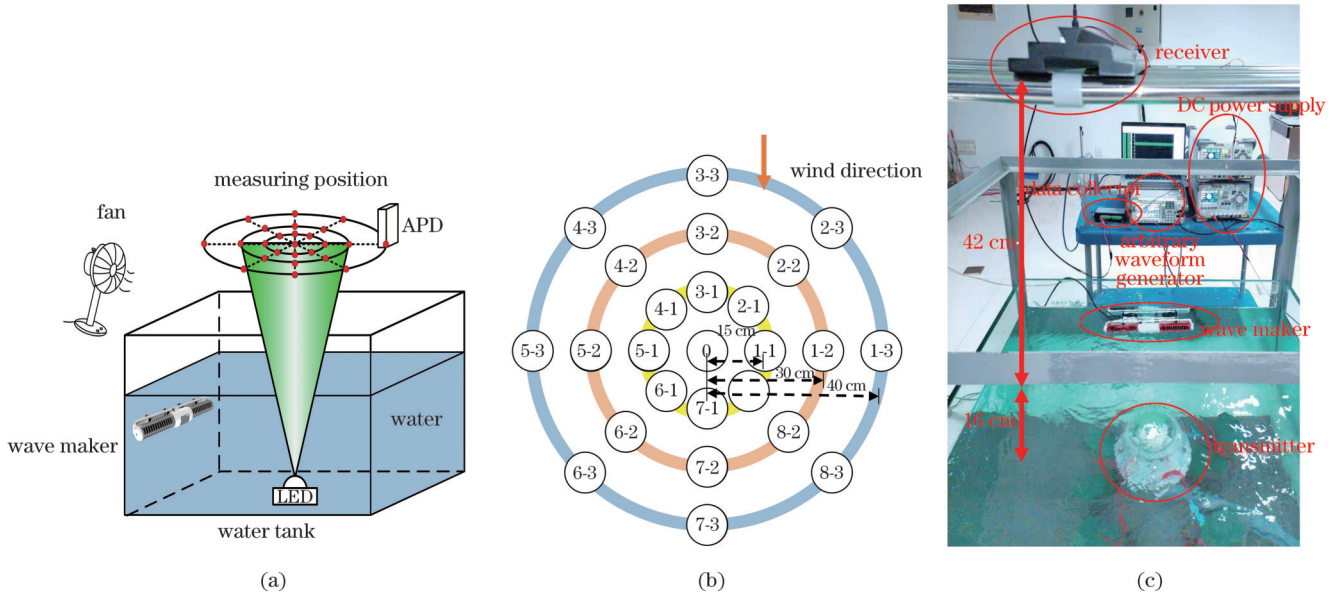


图 6 LED W2A-VLC 实验链路验证系统。(a) LED 实验测试链路结构图; (b) 接收端的圆盘装置; (c) LED W2A-VLC 实验平台照片
Fig. 6 Experiment link verification system LED W2A-VLC. (a) Structure of LED experimental test link; (b) disc device of receiver end; (c) photo of LED W2A-VLC experiment platform

最后, 对 25 个接收点的采样数据进行处理, 获得链路增益的空间分布; 然后通过实验表征接收端的光子响应, 并与图 5 所示仿真图形进行对比分析。各接收点的平均、最大和最小链路增益值如图 7 所示。图 7(a) 是平静水面下的链路增益分布, 图 7(b) 和图 7(c) 分别是规则波浪和随机波浪下的情况。在图 7(a) 中, 位于光斑中心的位置 0 处的链路增益最大, 平均值约为 0.04, 位置 1 处的链路增益的平均值约为 0.025, 光斑边缘位置 2 处链路增益的平均值约为 0.01。在平静水面条件下, 链路增益值从中心向边缘逐渐减小, 与图 7(a) 所示, 与图 5(a) 所示的仿真图形吻合。在一段采样时间内, 接收点的平均链路增益越大, 意味着该点的光子响应越强。在图 7(b) 和图 7(c) 中, 光斑内及边缘处 (即位置 2 内) 平均链路增益值大于平静水面情况的点被标为橙色。另外, 测量得到可以通信的最低链路增益 (即链路增益阈值) 约为 0.00462。当最大链路增益大于该阈值时, 表明某些时刻能够通信。在图 7(b) 和图 7(c) 中, 光斑外 (即位置 3 处) 最大链路增益值大于阈值的点标为黄色。在图 7(b) 中, 即规则波浪下, 位置 2 内有 10 个点的平均链路增益大于平静水面, 位置 3 上有 3 个点的最大

链路增益大于阈值。从图 7(b) 还可以看到, 这些橙色和黄色的标记点沿着风向聚集在圆盘的下半区域, 形成一个椭圆轮廓, 与图 5(b) 所示仿真图形极为相似, 进一步证实了光子的扩散和光束的漂移沿着风向, 同时也从宽光束的角度拓展了 LD 窄光束传输的结论。图 7(c) 所示的实验数据与图 5(c) 所示的仿真图形基本一致。在图 7(c) 中, 虽然标记点是随机分布的, 但仍呈现出了清晰的圆形轮廓, 形成了类似于图 3(f) 的正态分布结构, 而且图 7(c) 中位置 3 上的 8 个点的最大链路增益都大于阈值。因为随机波浪是由许多大小、频率和方向等各不相同且不断变化的外力驱动形成的, 导致了光子在水空界面的随机折射。从统计学观点来看, 这种随机折射增加了光子到达更远处的概率, 即增加了光子的覆盖范围。

综合以上分析发现, 在光束跨波动水空界面传输过程中, 产生波浪的外力扮演着非常重要的角色, 外力的大小和方向直接影响着光子响应的空间尺度与分布密度。因此, 需要充分考虑实际应用场景中的外部影响, 对系统链路及水上、水下收发平台进行优化设计。

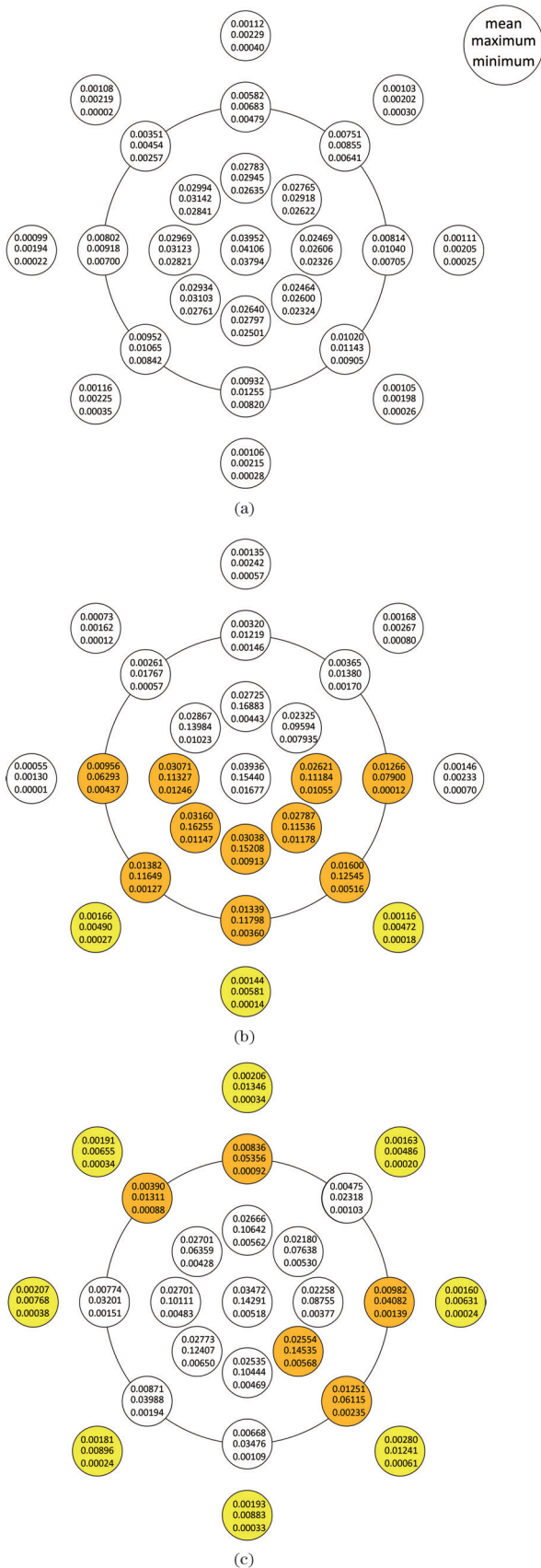


图 7 不同条件下各接收点的平均、最大和最小链路增益。

(a) 平静水面; (b) 规则波浪; (c) 随机波浪

Fig. 7 Mean, maximum and minimum link gains of each receiver point under different conditions. (a) Calm water surface; (b) regular waves; (c) random waves

4 结 论

研究了光束跨波动水空界面的传输与表征。通过实验结合理论仿真的方法,重点分析了两种动态水空界面下传输光子的物理响应,获得了LD窄光束跨动态水面传输的统计特性,并结合传输过程的动力学分析,获得了该传输统计特性与水空界面动态性的内在关联。从光束的传输角度来讲,宽光束LED可以看成是沿不同方向发射光子的多个窄束LD点组成的光源,因而进一步从宽光束的角度验证了窄光束传输的链路特征。结果表明:在光束跨波动水面空界传输过程中,水空界面的动态特征直接影响着传输光子的响应特性,水面动态特征与驱动外力密切相关,外力的大小、方向及复杂程度将直接影响光子响应的空间尺度与分布密度。这些规律将为实际的W2A-VLC系统应用提供帮助,尤其是对通信链路发射、接收、跟踪、瞄准装置参数选择,以及光路、光学系统的设计与优化等具有一定的指导价值。

最后对本文的理论模型进行补充说明。就接收端光子分布的总体结构与规律而言,当光束通过水空界面时,对于波浪尺寸大于光束尺寸的大波浪和光束尺寸大于波浪尺寸的小波浪这两种情况,本文的理论模型和分析方法均适用,且结论一致;但二者接收端光子分布结构的中心不同,即:在小波浪情况下,光子分布结构的几何中心通常在光源的光轴上;而在大波浪下,光子分布结构的中心位置相对于小波浪会发生偏移,需要沿引起波浪的主力方向进行位移修正。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Islam M S, Younis M, Ahmed A. Communication through air water interface using multiple light sources[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20-24, 2018, Kansas City, MO, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [3] Nabavi P, Yuksel M. Performance analysis of air-to-water optical wireless communication using SPADs[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 9-13, 2019, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [4] Chen L K, Shao Y J, Deng R. Robust UOWC systems against bubble-induced impairments via transmit/receive diversities[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100006.
- [5] 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.
- [6] Spagnolo G S, Cozzella L, Leccese F. Underwater optical wireless communications: overview[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2261.
- [7] Song A J, Stojanovic M, Chitre M. Editorial underwater acoustic communications: where we stand and what is next? [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(1): 1-6.
- [8] Hunt K P, Niemeier J J, Kruger A. RF communications in underwater wireless sensor networks[C]//2010 IEEE International Conference on Electro/Information Technology, May 20-22, 2010, Normal, IL, USA. New York: IEEE Press, 2010.
- [9] Huang X, Yang F, Song J. Hybrid LD and LED-based

- underwater optical communication: state-of-the-art, opportunities, challenges, and trends[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100002.
- [10] 李军, 罗江华, 元秀华. 水表面波扰动对无线光通信影响[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0706005.
Li J, Luo J H, Yuan X H. Influence of water surface wave disturbance on wireless optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0706005.
- [11] 任庭瑞, 于笑楠, 佟首峰, 等. 基于数字信号处理的高灵敏度水下光通信收发机设计与评估[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0406005.
Ren T R, Yu X N, Tong S F, et al. Design and evaluation of high-sensitivity underwater optical communication transceiver based on digital signal processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0406005.
- [12] Chen Y F, Kong M W, 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.
- [13] Xu J. Underwater wireless optical communication: why, what, and how?[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100007.
- [14] Tian P F, Chen H L, Wang P Y, et al. Absorption and scattering effects of Maalox, chlorophyll, and sea salt on a micro-LED-based underwater wireless optical communication[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100010.
- [15] Chen L K, Shao Y J, Di Y J. Underwater and water-air optical wireless communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(5): 1440-1452.
- [16] 胡思奇, 周田华, 陈卫标. 水下激光通信最大比合并分集接收性能分析及仿真[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206003.
Hu S Q, Zhou T H, Chen W B. Performance analysis and simulation of maximum ratio combining in underwater laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1206003.
- [17] Lin T R, Gong C, Luo J H, et al. Dynamic optical wireless communication channel characterization through air-water interface [C]//2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), August 9-11, 2020, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2020: 173-178.
- [18] Zhang L, Wang H, Zhao X, et al. Experimental demonstration of a two-path parallel scheme for m-QAM-OFDM transmission through a turbulent-air-water channel in optical wireless communications[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6672-6688.
- [19] Sun X B, Kong M W, Shen C, et al. On the realization of across wavy water-air-interface diffuse-line-of-sight communication based on an ultraviolet emitter[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19635-19649.
- [20] Nabavi P, Haq A F M S, Yuksel M. Empirical modeling and analysis of water-to-air optical wireless communication channels [C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), May 20-24, 2019, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [21] Islam M S, Younis M F. Analyzing visible light communication through air-water interface[J]. IEEE Access, 2019, 7: 123830-123845.
- [22] Di Y J, Shao Y J, Chen L K. Real-time wave mitigation for water-air OWC systems via beam tracking[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(1): 47-50.
- [23] Shao Y J, Deng R, He J, et al. Real-time 2.2-Gb/s water-air OFDM-OWC system with low-complexity transmitter-side DSP [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(20): 5668-5675.
- [24] Shao Y J, Tang X K, Zhang L, et al. On the performance of DCrT-spread-OFDM via water-air OWC system through waves [C]//2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), October 4-8, 2020, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [25] Lin T R, Huang N, Gong C, et al. Preliminary characterization of coverage for water-to-air visible light communication through wavy water surface[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(1): 7901013.
- [26] Davies M, Chattopadhyay A K. Stokes waves revisited: exact solutions in the asymptotic limit[J]. The European Physical Journal Plus, 2016, 131(3): 69.
- [27] Langley R S. On the time domain simulation of second order wave forces and induced responses[J]. Applied Ocean Research, 1986, 8(3): 134-143.
- [28] Jefferys E R. Directional seas should be ergodic[J]. Applied Ocean Research, 1987, 9(4): 186-191.
- [29] 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.

Characterization and Validation of Beam Transmission Through Wavy Water-to-Air Surface

Zhang Fan¹, Luo Jianghua^{1,2*}, Li Jun², Lin Tianrui³, Gong Chen³, Xu Zhengyuan³

¹Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University (Ministry of Education & Hubei Province), School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China;

²Zhongshan Zhongchuang Technology Research Institute of Opto-Electronics Industry, Zhongshan 528415, Guangdong, China;

³Key Laboratory of Wireless-Optical Communications, Chinese Academy of Sciences, School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China

Abstract

Objective To explore and exploit ocean resources, it is necessary to establish wireless communication networks between underwater and air platforms. In these wireless networks, data should be transmitted efficiently across the water-to-air (W2A) interface; reliable W2A communication links play a significant role in such data transmission. Although acoustic waves are the primary means for communication in water because of their long propagation distance (up to several kilometers), they are mostly reflected off when crossing the water surface. Moreover, the transmission rate of an acoustic communication system is relatively low (on the order of kb/s), which limits its application. Radio frequency waves are suitable for long distances (up to tens of kilometers) and high transmission rates (up to hundreds of Mb/s) of wireless communication in air, but they can only travel a few meters through water

because of their high absorption and attenuation in underwater environments. Compared with acoustic and RF waves, optical waves can achieve long-distance wireless transmission in both water and air media; they provide a very high bandwidth, high transmission rate, and low latency and enable the use of advanced transceiver devices. Thus, the use of optical waves is a potential solution for communication across the W2A interface. However, when a light beam passes across the W2A interface, the propagating photons experience an unpredictable path deviation owing to the dynamic nature of the waves. Therefore, it is necessary to obtain the statistical properties of the physical responses of photons passing across different W2A interfaces, which can be used to characterize the correlation between the light beam drift and water wave dynamics.

Methods This study focused on water-to-air visible light communication (W2A-VLC) through regular and random waves. The physical response of the propagating photons and corresponding link performances were evaluated by combining laboratory experiments with theoretical simulations. First, we built a laser diode (LD) transmission experiment and captured laser spots at the receiving end using a high-speed camera. The physical response of the propagating photons could be visualized by extracting the centroids of the laser spots, and a Monte Carlo simulation of the photon transmission was performed for comparative analysis. Second, by numerically fitting the centroid distribution, we further obtained the statistical properties of the photon responses under regular and random waves conditions. The inner dynamic processes of the statistical properties were also analyzed. Finally, we validated the narrow-beam characteristics from the perspective of wide-beam transmission through both theoretical simulations and experimental measurements. The statistical laws of the LD narrow beam were validated from the perspective of the LED wide beam.

Results and Discussions The physical response of the propagating photons was first theoretically predicted based on Monte Carlo simulations. In the case of a calm water surface, the photons are mainly distributed around the coordinate center of the receiving end and present a circular structure. In the case of regular waves, the photons are distributed in a strip shape at the receiving end, whereas in the case of random waves, the received photons diffuse from the center to the periphery, and the distribution range significantly increases [Fig. 3(a)–(c)]. The experimental results of the photon responses are consistent with the Monte Carlo simulation patterns. The corresponding statistical features were analyzed further. For regular waves, the centroid points on the x -axis (perpendicular to the wind) obey a normal distribution, whereas those on the y -axis (wind direction) obey a negatively skewed distribution with a skewed parameter of $\lambda' = -2.5$. For random waves, the distribution of the centroid points presents an approximately normal distribution (Fig. 4). We also justify the LD link characterization based on the simulation and real test of an LED transmitter. A Monte Carlo simulation of the LED wide-beam link was performed to obtain the light spot at the receiving end. The light spot on the calm water surface is a regular circle, and its brightness gradually decreases from the center. In the case of regular waves, the pattern of the light spot is elliptical. Conversely, in the case of random waves, the light spot still exhibits a circular outline, but the bright and dark areas in the light spot are irregularly distributed (Fig. 5). An experimental verification system for the LED link was designed to verify the simulation and extend the general statistical laws of the LD narrow beam (Fig. 6). The experimental results reveal that the photon diffusion and beam drift are mainly along the wind direction, consistent with the conclusion obtained for the LD narrow-beam link. Furthermore, the spatial distribution of the link gain values is consistent with the simulation pattern (Fig. 7).

Conclusions In this study, narrow-beam light transmission through a wavy water-to-air (W2A) surface was evaluated. The physical response of the propagating photons and corresponding statistical characteristics were determined through a combination of lab experiments and theoretical simulations. We experimentally tested the LD narrow-beam link and obtained the photon-response characteristics. The test experiment reveals that, for regular waves, the photon response presents a negatively skewed distribution in the wind direction, whereas for random waves, the photon response shows a normal distribution. These statistical features imply an intrinsic dynamic correlation of the photon response with the wavy W2A surface and its driving forces. Because the LED transmitter can be treated as the integration of infinite LD lights over space, the narrow-beam link characteristics were validated using a wide-beam transmitter perspective. The simulation and real test of the LED transmitter confirm the characterization of the narrow-beam link under both regular and random waves.

Key words optical communications; regular waves; random waves; Monte Carlo simulation; narrow-beam; wide-beam