

# 基于全内反射透镜二次配光的水下 LED 通信研究

王涛<sup>1,2\*</sup>, 韩彪<sup>1</sup>, 史魁<sup>1</sup>, 吴亚凤<sup>1</sup>, 郑运强<sup>1\*\*</sup>, 韩毅<sup>1</sup>, 谢小平<sup>1</sup>, 汪伟<sup>1\*\*\*</sup>, 孟佳成<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 蓝绿 LED 通信被认为是解决水下近距离高速无线数据传输的有效手段。然而由于 LED 发散角较大, 造成通信链路的几何损耗增加, 制约了水下 LED 通信距离的提升。针对这一问题, 提出了一种基于全内反射(TIR)透镜压缩水下 LED 通信阵列光源出射角的方法, 将 LED 通信光源的出射角从 130°压缩到 7°; 利用该光源研制发射样机, 在大型水池中搭建测试系统, 并对发射机的性能进行测试。结果表明, 所设计的通信样机在水下传输距离为 16.6 m 时, 最大可支持 23 Mbit/s 的传输速率; 与未采用 TIR 透镜时相比, 在同等速率条件下, 传输距离增加 9.3 m。这表明基于 TIR 透镜二次配光的方法, 可有效减小发射机出射角, 降低链路损耗, 增强通信系统的传输能力。这为提升水下 LED 通信的传输性能提供了新的技术思路。

**关键词** 光通信; 无线光通信; 水下光通信; 蓝绿光通信; 全内反射透镜

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0806001

## Underwater LED Communication Based on Secondary Light Distribution with Total Internal Reflection Lens

Wang Tao<sup>1,2\*</sup>, Han Biao<sup>1</sup>, Shi Kui<sup>1</sup>, Wu Yafeng<sup>1</sup>, Zheng Yunqiang<sup>1\*\*</sup>, Han Yi<sup>1</sup>,  
Xie Xiaoping<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1\*\*\*</sup>, Meng Jiacheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Blue-green LED communication is considered to be an effective means to solve the problem of underwater short-distance high-speed wireless data transmission. However, as LED divergence angle is usually quite large, the geometric loss is great in such communication link, which would reduce the communication distance. Aiming at this problem, a method is proposed to compress the emitter angle of underwater LED array light source with the total internal reflection (TIR) lens in this work. First, the divergence angle of LED array source is compressed from 130° to 7°. Then, a communication transmitter prototype is developed with the source, and a test system is built in a large tank to test the performance of the transmitter. The experimental results show that the communication prototype designed in this paper can support a maximum transmission rate of 23 Mbit/s when the underwater transmission distance is 16.6 m. Compared with the case without TIR lens, the maximum transmission distance increases 9.3 m at the same rate. It shows that the method of secondary light distribution with TIR lens can effectively reduce the transmitter's divergence angle and the link loss of transmission system, enhance the transmission capacity of communication system. It provides a new technical means for improving the transmission performance of underwater LED communication.

**Key words** optical communications; wireless optical communication; underwater communication; blue-green optical communication; total internal reflection lens

**OCIS codes** 060.4510; 010.4450; 220.4830

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-03-18; 录用日期: 2019-04-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0803900, 2018YFC0307904)、青岛海洋科学与技术试点国家实验室主任基金(QNLM201716)

\* E-mail: wangtao2016@opt.cn; \*\* E-mail: zhengyunqiang@opt.ac.cn; \*\*\* E-mail: wangwei2012@opt.ac.cn

## 1 引 言

随着水下探测技术的快速发展,人类能够获取的海洋信息与日俱增,这对水下无线通信设备的传输能力提出了新的要求<sup>[1]</sup>。当前,传统的水声通信虽然具有传输距离远的优点,但是受声波带宽、多路径效应和 underwater 声学噪声等因素的影响,传输速率一般只有 kbit/s 量级,存在速率瓶颈难题<sup>[2]</sup>。近年来,蓝绿光波段的无线光通信由于具有海水穿透力强、带宽大和灵活机动等突出优点,被认为是一种解决水下高速数据传输的有效手段,已成为水下通信领域的研究热点<sup>[3-7]</sup>。

对于水下无线光通信,蓝绿光信号的产生是该技术在实际应用中需要解决的核心问题之一。由于蓝绿波段的通信调制器件成熟度较低,当前的蓝绿光信号通常是通过直接控制发光二极管(LED)<sup>[8-15]</sup>或激光二极管(LD)<sup>[16-20]</sup>的出射光强实现的。其中 LED 由于具有电光效率高、稳定性好<sup>[17]</sup>、体积小和易于集成等优点,在工程实践中被广泛使用。近年来以美国伍兹霍尔海洋研究所为代表的研究机构的 Farr 等<sup>[8-11]</sup>采用蓝绿 LED 作为光源,成功实现了深海数据的高速传输,验证了 LED 通信在水下应用中的可行性。然而由于 LED 发散角通常在  $120^\circ$  左右<sup>[21]</sup>,通信链路空间的损耗较大,制约了传输距离的提升。因此通过二次配光的方法缩小通信发射机出射角,对于提升水下 LED 通信传输距离显得尤为重要。

在 LED 光束整形器件中,全内反射(TIR)透镜具有光能利用率高和体积小的优点,在 LED 窄光束光学系统设计中被广泛使用。基于此,本文将 TIR 透镜应用到水下 LED 通信当中,研制了小角度的通信发射样机;并在长宽深为  $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 14\text{ m}$  的大型水池中,实验验证了 TIR 透镜对通信系统性能的提升效果。

## 2 基于 TIR 透镜的水下小角度 LED 通信发射机

下面分别对 TIR 透镜工作原理、基于 TIR 透镜的 LED 通信光源以及小角度 LED 通信发射样机予以介绍。

## 2.1 基于 TIR 透镜的 LED 二次配光原理

TIR 透镜工作原理如图 1 所示,透镜结构呈旋转对称状,主要由 4 个面组成:凹陷的侧表面、两侧的 TIR 面、内凹的非球面以及顶部表面。对于从

LED 出射的光线,角度较小的中心部分被内凹的非球面折射,经由顶部表面射出,相当于经过了一个非球面透镜;角度较大的部分被凹陷的侧表面折射,并被 TIR 表面反射,实现光束的收集和角度整形。TIR 透镜在压缩 LED 出射角时,可以同时兼顾光线中不同角度的分量,光能利用率较高<sup>[22]</sup>。实际应用中,可以通过合理设计 TIR 透镜的表面形状,实现不同的出射角<sup>[23-24]</sup>。

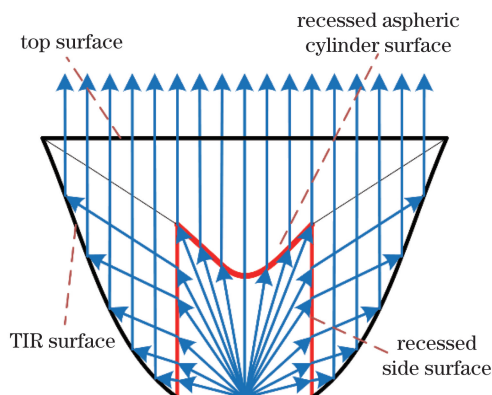


图 1 TIR 透镜工作原理

Fig. 1 Schematic of TIR lens

## 2.2 基于 TIR 透镜的水下 LED 通信光源

发射机通信光源的结构如图 2 所示,所设计的通信光源由 7 个独立工作的蓝光 LED 组成,分布在一个直径  $D=105\text{ mm}$  的圆形铝基板上。其中 1 个 LED 位于铝基板中心,另外 6 个均匀分布在以铝基板圆心为中心、边长为  $35\text{ mm}$  的正六边形顶角上。以 LED 阵列作为光源一方面能够提高出射光功率,另一方面可在 1 个或多个 LED 损坏的情况下确保光源继续工作,增强了系统的稳定性。

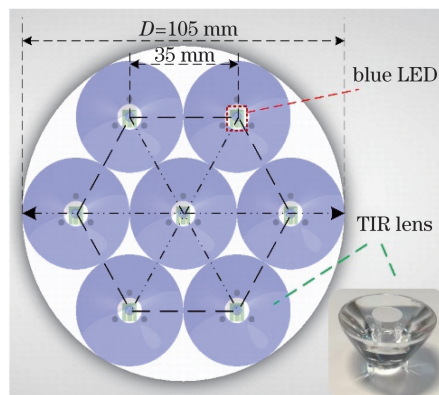


图 2 发射机通信光源的结构图

Fig. 2 Structure diagram of communication source

未加 TIR 透镜之前,用分布式光度计对 LED 阵列辐射强度进行测量,未装配 TIR 透镜的 LED 阵列的相对辐射分布如图 3 所示。其中横坐标表示

辐射角度,纵坐标为归一化辐射强度;图中曲线分别代表  $0^\circ/180^\circ$ 、 $45^\circ/225^\circ$ 、 $90^\circ/270^\circ$  和  $135^\circ/315^\circ$  4 个不同经度截面的辐射强度分布。可以看出 4 条曲线基本重合,这表明 LED 阵列辐射强度在空间呈旋转对称分布;此外,在不做任何光学整形的情况下,LED 辐射强度分布近似服从朗伯分布规律,在半峰全宽定义下的发散角约  $130^\circ$ 。

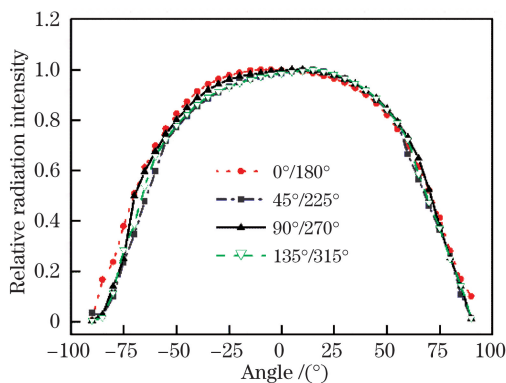


图 3 未装配 TIR 透镜的 LED 阵列的相对辐射分布

Fig. 3 Relative radiation intensity distribution of the LED array without TIR lens

为缩小光源出射角,采用 7 个 TIR 透镜分别对光源中的 LED 进行二次配光。由于 TIR 透镜设计方法较为成熟,在此直接选用商业化产品(JY-AAA0104P-3522,深圳晶艺光电科技有限公司,中国<sup>[25]</sup>),TIR 透镜指标如表 1 所示。装配 TIR 透镜二次配光后的 LED 阵列的相对辐射分布如图 4 所示。图中曲线分别代表  $0^\circ/180^\circ$ 、 $45^\circ/225^\circ$ 、 $90^\circ/270^\circ$  和  $135^\circ/315^\circ$  4 个不同经度截面的辐射强度分布。可以看出 4 条曲线大致重合,因此经过 TIR 配光后的辐射分布依然呈现旋转对称的特点。与图 3 相比,光束出射角缩小为  $7^\circ$ ,约缩小为原来的  $1/18$ 。

表 1 TIR 透镜指标

Table 1 Parameters of TIR lens

Diameter /mm	Height /mm	Collimating angle (half-angle) /( $^\circ$ )	Material
35	22.6	4	Acrylic

### 2.3 基于 TIR 透镜二次配光的水下 LED 通信发射机

以上述 LED 阵列作为光源,发射机采用圆柱形不锈钢壳体进行水密封装;前端透明窗口选用石英玻璃;后端留有水密接插件,用于连接电缆,为发射机供电和提供数据连接。

当发射机工作时,通过外部 TTL(Transistor-Transistor Logic)电平以开关键控(OOK)的方式驱动 LED 发光,实现通信数据的电光转换。在此选择

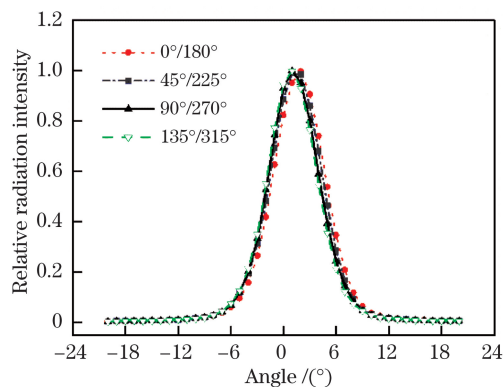


图 4 装配 TIR 透镜二次配光后的 LED 阵列的相对辐射分布

Fig. 4 Relative radiation intensity distribution of the LED array with TIR lens

OOK 作为信号调制格式,主要是因为这种方式电路简单、易于实现及水下信道传输适应性较好。受光源带宽的限制,该发射机的最高调制速率为 24 Mbit/s。图 5 展示了在该通信速率下的调制信号与接收信号眼图,图中上方曲线表示原始的调制电信号,下方曲线是对应的光强检测信号。

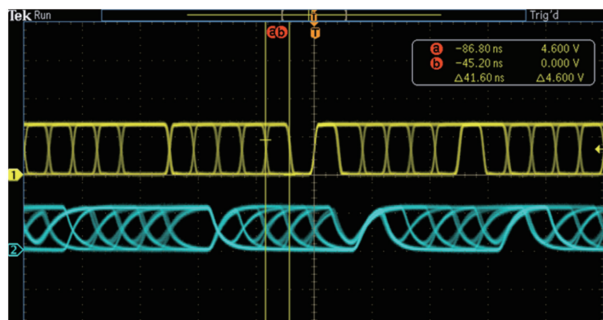


图 5 速率为 24 Mbit/s 的调制信号与接收信号眼图

Fig. 5 Eye diagram of modulating signal and receiving signal at 24 Mbit/s

## 3 基于 TIR 透镜的通信发射机性能测试

### 3.1 实验装置及原理

为检测 TIR 透镜对 LED 通信的提升效果,在长宽各为 20 m、深为 14 m 的大型消声水池中搭建通信系统测试发射机性能。通信系统实验装置如图 6 所示,整个系统包括发射机、接收机、误码仪、时钟数据恢复电路(CDR)、水缆及 2 台直流电压源。其中误码仪兼具伪随机序列产生和误码测试 2 种功能。

在该系统中,发射机和接收机位于水下,通过水缆分别与岸上的电源和测试设备连接。在测试时,

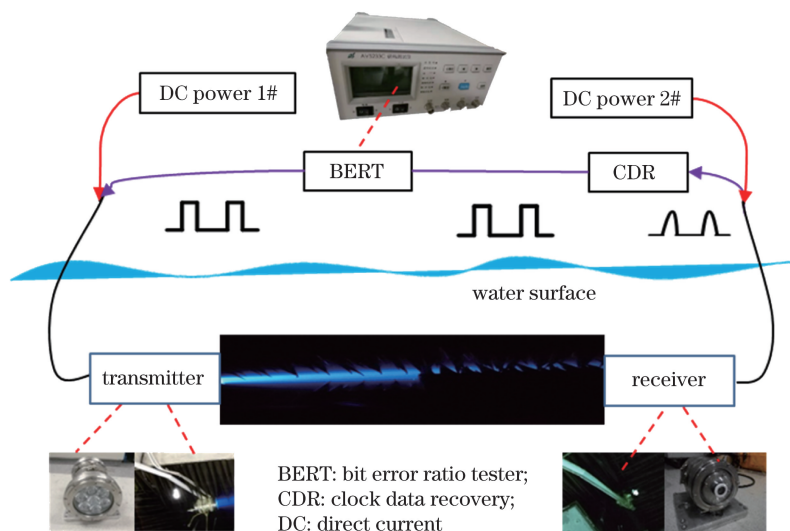


图 6 水下无线光通信(UOWC)系统实验装置  
Fig. 6 Schematic setup of UOWC system

首先由误码仪生成不同速率的伪随机二进制序列 (PRBS) 作为原始信号, 通过电缆输入到发射机, 并将数据调制到光信号上; 光信号在水中传输一段距离后到达接收机; 接收机中的光电探测装置将光信号转换为电信号, 通过电缆与岸上 CDR 电路相连, 利用 CDR 电路恢复出通信数据, 并将其接入误码仪, 与原始信号比对得到该通信系统的误码率 (BER)。通信系统速率可通过设置误码仪参数进行调节。

在实验中, 发射机和接收机皆用长杆固定, 放入水下约 1 m 深处。为降低背景噪声对通信系统的影响, 实验在黑暗环境下进行。受实验水池表面障碍物的限制, 测试过程中通过移动接收机, 选取几个典型位置调节通信距离。

### 3.2 实验结果及讨论

受消声水池表面障碍物的限制, 实验中只能选取几个特定的位置进行光通信实验。分别在传输距离为 11.4、12.6、15.2、16.6 m 时, 将调制速率为 10 Mbit/s 作为起点, 按照 1 Mbit/s 的间隔增加速率, 测试不同距离和速率下的误码率 (采用 TIR 透镜), 如图 7 所示。

设置传输距离为 11.4 m、速率小于 22 Mbit/s 时, 误码率为 0; 22~24 Mbit/s 对应的误码率分别为  $1.72 \times 10^{-9}$ 、 $1.74 \times 10^{-7}$ 、 $1.56 \times 10^{-5}$ 。设置传输距离为 12.6 m、速率小于 19 Mbit/s 时, 误码率为 0; 19~24 Mbit/s 对应的误码率分别为  $9.97 \times 10^{-9}$ 、 $1.64 \times 10^{-7}$ 、 $3.86 \times 10^{-6}$ 、 $9.32 \times 10^{-6}$ 、 $2.07 \times 10^{-5}$ 、 $5.00 \times 10^{-4}$ 。设置传输距离为 15.2 m、速率小于 18 Mbit/s 时, 误码率为 0; 18~23 Mbit/s 对应的

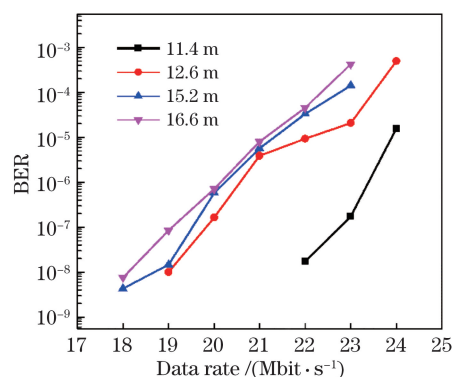


图 7 不同距离和速率下的误码率 (采用 TIR 透镜)  
Fig. 7 BER versus data rate at different transmission distances (with the TIR lens)

误码率分别为  $4.32 \times 10^{-9}$ 、 $1.45 \times 10^{-8}$ 、 $5.71 \times 10^{-7}$ 、 $5.68 \times 10^{-6}$ 、 $3.29 \times 10^{-5}$ 、 $1.42 \times 10^{-4}$ 。设置传输距离为 16.6 m、速率小于 18 Mbit/s 时, 误码率为 0; 18~23 Mbit/s 对应的误码率分别为  $7.62 \times 10^{-9}$ 、 $8.49 \times 10^{-8}$ 、 $7.18 \times 10^{-7}$ 、 $8.05 \times 10^{-6}$ 、 $4.57 \times 10^{-5}$ 、 $4.23 \times 10^{-4}$ 。可以看出, 随着传输距离和速率的增加, 系统的误码率不断变大。一般认为, 通信误码率小于  $3.8 \times 10^{-3}$  (通信系统误码前向纠错极限) 的系统可用于数据传输<sup>[26]</sup>。因此当传输距离为 11.4 m 和 12.6 m 时, 该系统可支持的传输速率为 24 Mbit/s; 当传输距离为 15.2 m 和 16.6 m 时, 该系统可支持的传输速率为 23 Mbit/s。

为了对比, 去除发射机中的 TIR 透镜, 保持发射机设置不变, 在传输距离分别为 7.3、8.2、9.6、11.4 m 时重复上述实验, 不同距离和速率下的误码率 (未采用 TIR 透镜) 如图 8 所示。设置传输距离为 7.3 m、速率小于 22 Mbit/s 时, 误码率为 0; 22~

24 Mbit/s 对应的误码率分别为  $1.82 \times 10^{-8}$ 、 $1.08 \times 10^{-6}$ 、 $4.95 \times 10^{-1}$ 。设置传输距离为 8.2 m、速率小于 20 Mbit/s 时,误码率为 0;20~23 Mbit/s 对应的误码率分别为  $5.83 \times 10^{-9}$ 、 $5.10 \times 10^{-8}$ 、 $2.29 \times 10^{-7}$ 、 $7.03 \times 10^{-2}$ 。设置传输距离为 9.6 m、速率小于 17 Mbit/s 时,误码率为 0;17~21 Mbit/s 对应的误码率分别为  $1.26 \times 10^{-9}$ 、 $8.55 \times 10^{-9}$ 、 $3.05 \times 10^{-8}$ 、 $5.73 \times 10^{-6}$ 、 $4.36 \times 10^{-1}$ 。设置传输距离为 11.4 m、速率小于 11 Mbit/s 时,误码率为 0;11~15 Mbit/s 对应的误码率分别为  $3.71 \times 10^{-9}$ 、 $3.89 \times 10^{-7}$ 、 $6.51 \times 10^{-5}$ 、 $4.11 \times 10^{-4}$ 、 $4.51 \times 10^{-1}$ 。可以看出,随着传输距离的增加,系统的误码率不断变大。当传输距离为 7.3 m,该系统可支持的传输速率为 23 Mbit/s;当传输距离为 8.2 m 时,可支持传输速率为 22 Mbit/s;当距离为 9.6 m,可支持传输速率为 20 Mbit/s;当距离为 11.4 m 时,可支持传输速率为 14 Mbit/s。

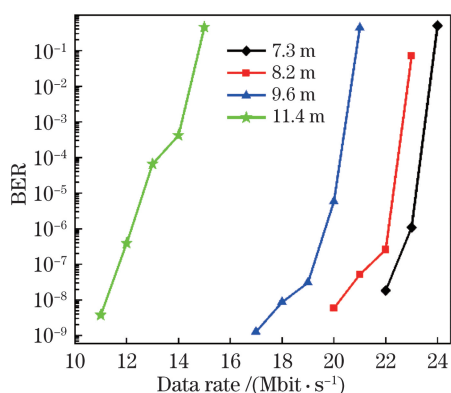


图 8 不同距离和速率下的误码率(未采用 TIR 透镜)  
Fig. 8 BER versus data rate at different transmission distances (without the TIR lens)

对比图 7 和图 8 的测试结果发现,当发射机中采用 TIR 透镜时,系统可支持的传输距离得到明显的增加;在同一传输距离下,系统可支持的传输速率明显提升。一方面,以最大传输速率为 23 Mbit/s 为例。不采用 TIR 透镜时,最远传输距离为 7.3 m,采用 TIR 透镜后这一距离提升到 16.6 m。另一方面,以传输距离为 11.4 m 时可支持的链路速率为例。不采用 TIR 透镜时,最大可支持传输速率为 14 Mbit/s;当采用 TIR 透镜时,可支持速率为 24 Mbit/s。因此采用 TIR 透镜后,通信系统的性能得到显著的提升。

结合图 3 和图 4 所示的辐射强度分布可以看到,系统性能改善的主要原因是:TIR 透镜减小了发射机的出射角,降低了通信链路的几何损耗,提高

了接收光信号的信噪比。

## 4 结 论

将 TIR 透镜应用到水下 LED 通信光源设计中,研制了发射样机,并在大型水池中验证了 TIR 透镜对通信性能的提升效果。结果表明:采用 TIR 透镜后,通信发射机出射角从  $130^\circ$  缩小到  $7^\circ$ ;在相同的传输速率下,通信系统的传输距离得到明显的提高;在相同的通信距离下,通信系统可支持的传输速率得到明显的提升。这表明基于 TIR 透镜二次配光的方法可以有效地减小通信发射机的出射角,降低通信链路损耗,提升通信系统的传输性能。这可为提高水下 LED 通信能力提供新的技术思路。

## 参 考 文 献

- [1] Xu W, Yan S F, Ji F, *et al.* Marine information gathering, transmission, processing, and fusion: current status and future trends [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2016, 46(8): 1053-1085.  
徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(8): 1053-1085.
- [2] Kumar P, Trivedi V K, Kumar P. Recent trends in multicarrier underwater acoustic communications [C] // 2015 IEEE Underwater Technology (UT), February 23-25, 2015, Chennai, India. New York: IEEE, 2015: 15163550.
- [3] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518-1547.
- [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] Mi L, Hu S Q, Zhou T H, *et al.* Long distance underwater laser communication system based on low-density parity check codes and pulse-position modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1006002.  
米乐, 胡思奇, 周田华, 等. 基于低密度奇偶校验码和脉冲位置调制的水下长距离光通信系统设计 [J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1006002.
- [6] 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.
- [7] Wang Y, Zhang P, Li X Y, *et al.* Optical

- communication performance of solitonic pulses in weak oceanic turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506004.
- 王阳, 张鹏, 李晓燕, 等. 海洋弱湍流条件下光孤子脉冲通信性能[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506004.
- [8] Farr N, Chave A D, Freitag L, *et al.* Optical modem technology for seafloor observatories[C]//OCEANS 2006, September 18-21, 2006, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2006: 9431301.
- [9] Farr N, Bowen A, Ware J, *et al.* An integrated, underwater optical/acoustic communications system [C]//OCEANS'10 IEEE SYDNEY, May 24-27, 2010, Sydney, Australia. New York: IEEE, 2010: 11595850.
- [10] Bowen A D, Jakuba M V, Farr N E, *et al.* An untethered ROV for routine access and intervention in the deep sea[C]//2013 OCEANS-San Diego, September 23-27, 2013, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2013: 14115423.
- [11] Pontbriand C, Farr N, Hansen J, *et al.* Wireless data harvesting using the AUV sentry and WHOI optical modem[C]//OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington, October 19-22, 2015, Washington, D. C. New York: IEEE, 2015: 15798705.
- [12] Wu M L, Guo J, Liu W K, *et al.* Scheme and implementation of bi-directional visible light communication system with LED as both optical transmitter and receiver elements[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0406003.
- 武梦龙, 郭佳, 刘文楷, 等. LED作为收发元件的双向可见光通信系统方案及实现[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0406003.
- [13] Cossu G, Sturniolo A, Messa A, *et al.* Full-fledged 10base-T ethernet underwater optical wireless communication system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(1): 194-202.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, *et al.* 34.5 m underwater optical wireless communication with 27.0 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27937-27947.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Zhang L, Wang H, Shao X P. Improved m-QAM-OFDM transmission for underwater wireless optical communications[J]. Optics Communications, 2018, 423: 180-185.
- [20] Xue B, Liu Z, Yang J, *et al.* Characteristics of III-nitride based laser diode employed for short range underwater wireless optical communications[J]. Optics Communications, 2018, 410: 525-530.
- [21] Lumileds LED Lighting. LED products[OL]. [2018-12-25]. <https://www.lumileds.com/>.
- [22] Su Z P. Design methods for non-imaging optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 1-14.
- 苏宙平. 非成像光学系统设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 1-14.
- [23] Jiang J B, To S, Lee W B, *et al.* Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight[J]. Optik, 2010, 121(19): 1761-1765.
- [24] Xin D, Liu H, Lu Z W, *et al.* Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522003.
- 辛迪, 刘华, 卢振武, 等. 可变视场角LED照明光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522003.
- [25] Kong Optics. TIR lens[OL]. [2018-12-25]. <http://www.king-lens.com/>.
- [26] Kong M W, Lü 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.