中国光学 Chinese Optics 核心期刊

20 m水下无线蓝光LED通信系统样机设计

董冰 佟首峰 张鹏 王大帅 马晨源

Design of a 20 m underwater wireless optical communication system based on blue LED

DONG Bing, TONG Shou-feng, ZHANG Peng, WANG Da-shuai, MA Chen-yuan

引用本文:
董冰, 佟首峰, 张鹏, 王大帅, 马晨源. 20 m水下无线蓝光LED通信系统样机设计[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1451−1458. doi: 10.37188/CO.2020−0190
DONG Bing, TONG Shou-feng, ZHANG Peng, WANG Da-shuai, MA Chen-yuan. Design of a 20 m underwater wireless optical communication system based on blue LED[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1451-1458. doi: 10.37188/CO.2020-0190

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2020−0190

第 14 卷　第 6 期　　中国光学　　Vol. 14　No. 6
2021 年 11 月　　Chinese Optics　　Nov. 2021

文章编号　2095-1531(2021)06-1451-08

20 m 水下无线蓝光 LED 通信系统样机设计

董　冰,佟首峰*,张　鹏,王大帅,马晨源
(长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 在清澈海水中,透射窗口在蓝绿光波段,蓝光在海水中具有很好的传输特性。为了满足深海观测网络及平台间的高速率、大容量的通信需求,本文提出了一种水下无线可见光通信系统。该系统采用 470 nm LED 阵列拼接结构,增大束散角,并且提出采用菲涅尔透镜作为光学天线,实现大视场接收。在 20 m 的水下通信距离下,成功实现了 5 Mbit/s 通信速率,误码率低至 10^{-6} 的可靠通信,并完整地组装出了工程样机,为后续的水下动态激光通信系统奠定了基础。

关　键　词: 无线光通信;水下光通信;可见光通信;蓝光 LED
中图分类号: TTN929.3　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2020-0190

Design of a 20 m underwater wireless optical communication system based on blue LED

DONG Bing, TONG Shou-feng*, ZHANG Peng, WANG Da-shuai, MA Chen-yuan
(*National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *tsf*1998@*sina.com*

Abstract: In pure seawater, the transmission window is in the blue-green light band, and blue light has good transmission characteristics. This paper proposes an underwater wireless optical communication system that uses a 470 nm LED array stitching structure, increasing the diverging angle. At the same time, we use Fresnel lens as the optical antenna realizing the wide field of view receiving. At an underwater distance of 20 m, this system could successfully achieve reliable communication at a rate of 5 Mbit/s (data rate) and a BER of 10^{-6}, which lays a foundation for subsequent underwater dynamic laser communication systems.

Key words: wireless communication; underwater optical communication; visible light communication; blue LED

收稿日期: 2020-10-23; **修订日期:** 2020-11-11

基金项目: 国防基础科研计划稳定支持项目(No. JCKYS2020604SSJS012);国防科技重点实验室基金项目(No. 201911XXX401);吉林省教育厅科学技术研究重点项目(No. JJKH20210820KJ)

Supported by National Defense Basic Research Program Stability Support Project (No. JCKYS2020604SSJS012); National Defense Science and Technology Key Laboratory Fund Project (No. 201911XXX401); Science and Technology Research Key Project of Jilin Province Education Department (No. JJKH20210820KJ)

1 引 言

海洋覆盖了地球 71% 的表面积，蕴含着丰富的科学宝藏。但即使在 21 世纪的今天，人类仍然对海斗深渊（6 000~11 000 m）的自然信息知之甚少，近年来深渊科考成为各国竞相研究的热点。空间激光通信也称为无线光通信，是指利用光束作为载波在空间直接进行语音、数据、图像等信息传输的一种技术[1-2]。深海作业的关键技术之一就是水下无线光通信技术，以往水下通信多利用声纳来进行，然而即使是利用高速相干接收技术的水声通信系统，通信速率也仅能达 5~15 kbit/s，难以满足大量信息高速率传输的需求。深海间的信息交换主要是利用水下自主航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 在水下与水面智能浮标间进行信息传输，水下自主航行器以电池为动力源工作于深海[3]。水下无线光通信利用蓝绿光作为信号载体进行通信，具有海水穿透能力强、信息容量大、传输速率高、隐蔽性好、不易被干扰、接收天线轻小等特点[4-6]，。

目前，多数的水下无线光通信系统采用激光二极管（Laser Diode, LD）作为发射光源，2015 年 8 月，Hassan Makine Oubei 课题组建立了 5.4 m 的水下无线光通信链路[7]，采用 450 nm 的蓝光 LD 作为信号光源，调制方式采用 16-正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 和 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex) 技术，采用雪崩光电二极管（Avalanche Photo Diode, APD）作为通信接收单元，传输速率为 4.8 Gbit/s, BER 为 2.6×10^{-3}。2016 年 10月，阿卜杜拉国王科技大学的 Chao Shen 等人利用 450 nm 蓝光 LD 作为信号光源，基于 OOK-NRZ 的调制方式，采用 APD 作为通信接收单元，此通信链路的数据传输速率能达到 2 Gbit/s，通信距离为 12 m，BER 为 2.8×10^{-5}；当通信距离提高到 20 m 时，数据传输速率也能达到 1.5 Gbit/s，BER为 3.0×10^{-3}[8]。

从 20 世纪 60 年代开始，我国的科研机构紧跟国际发展，已经开始进行水下无线光通信技术的相关研究，国内在水下无线光通信领域也取得了比较丰富的研究成果，无论是传输距离还是通信速率，都与国外的研究水平相当，甚至部分研究成果在技术参数上还略有超出。然而这些研究成果大部分都仅限于实验室内，其实验条件较为理想，往往与实际情况相差很大，还需要进行大量的外场实验和实际应用，积累各种水下工作环境无线光通信技术的工程经验。

水下激光通信具有束散角小、功率高的特点，要求其对准精度高，并且激光对人眼伤害大，操作难度较高，而基于 LED 的水下无线光通信系统具有大束散角、体型轻便、对人眼伤害较小等优点。因此，本文设计了一种基于蓝光 LED 阵列的水下无线光通信系统，并完成了样机的工程化设计及实验测试，误码率低至 10^{-6}，能准确不间断地传输文本、图像等信息。测试结果表明该系统在水下可进行可靠的无线光通信，操作简单，性能稳定。

2 外界约束条件分析

2.1 海水对光的吸收效应

海水对光的吸收表现为入射到海水中的部分光子能量转化为其他形式的能量，如热动能、化学势能等，是海水的固有光学特性，主要包括纯海水吸收、黄色物质吸收、浮游生物的吸收以及悬浮颗粒的吸收等。在深海中，由于太阳光的减弱使得深海中的浮游生物等有机物含量明显下降，此时主要影响海水吸收效应的因素是纯水的吸收以及溶解在水中的无机盐[9]（如 NaCl、KCl、$CaCl_2$ 等）对光的吸收，由于对蓝光的吸收系数是最小的，使得蓝光在深海中的传输有比较明显的优势。忽略其他成分对光波的吸收作用，海水对传输光信号总吸收系数表示为:

$$\alpha(\lambda)=\alpha_{\mathrm{w}}(\lambda)+\alpha_{\mathrm{y}}(\lambda)+\alpha_{\mathrm{p}}(\lambda)+\alpha_{\mathrm{NAP}}(\lambda) \quad , \tag{1}$$

式中α_{w}表示纯水的吸收，α_{y}表示黄色物质的吸收，α_{p}表示浮游生物的吸收，α_{NAP}表示的悬浮颗粒的吸收。

2.2 海水对光的散射效应

海水的散射效应最主要考虑纯海水散射和悬浮颗粒散射的影响。纯海水的散射主要是有水分子以及各种离子散射造成的，其散射系数的经验公式为:

$$b_{\mathrm{w}}(\lambda)=b_{\mathrm{w}}(\lambda_0)\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-4.32} \quad , \tag{2}$$

其中, $b_w(\lambda_0)$ 为参考点处波长的散射系数, $b_w(\lambda)$ 为某波长光在海水中的散射系数。此外, 海水中存在大量悬浮颗粒, 光束在水中遇到质点之后将会发生散射, 如图 1 所示[10]。

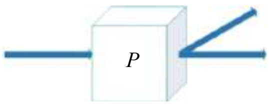


图 1　光束遇质点后的散射示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the scattering of a light beam upon contact with a particle

采用光谱体积散射函数模拟光在水中的散射情况, 将体积散射函数在所有方向进行积分, 得出散射常数 $b(\lambda)$ 为:

$$b(\lambda) = 2\pi\int_0^{\pi}\beta(\psi,\lambda)\sin\psi \mathrm{d}\psi \quad , \tag{3}$$

综合考虑海水吸收和散射因素, 海水对光功率传输的总衰减系数可表示为:

$$c(\lambda) = \alpha(\lambda) + b(\lambda) \quad . \tag{4}$$

2.3　深海环境背景光分析

在复杂多变的水下环境中, 大多数的水下光通信系统的表现不能令人非常满意, 一是因为光在海水中的衰减造成光功率的流失; 二是因为接收视场角内的环境光会由于水下通信信道中的悬浮粒子和水分子的散射进入探测系统, 对探测单元的性能产生影响[11-12], 这部分散射光通常被称为背景光, 也是造成水下光通信系统探测单元性能退化的一个主要因素。背景光的影响因素主要包括自然光、水下生物荧光以及后向散射光。

2.3.1　自然光的影响

自然光照是由水面上方大气中的光线穿透海水表面并射入水体中的。

从图 2(彩图见期刊电子版) 可以看出, 在表皮海水中(深度<50 m), 太阳光中各个波段的光几乎都能渗透到海水中, 其产生的影响较大, 必须予以抑制; 当在深水中时(深度≥200 m), 太阳光中能入射到海水的光只剩下蓝绿光波段。再将两图进行横向对比, 可以发现, 当在沿海水域中时, 太阳光能入射到海水中的深度在 50 m 左右, 而在清澈的海水中, 太阳光可入射到水面下 200 m 左右, 如果水下光通信系统的水下操作深度在 0~200 m 内时, 存在太阳光产生的背景光噪声, 有必要采用滤波技术加以抑制。

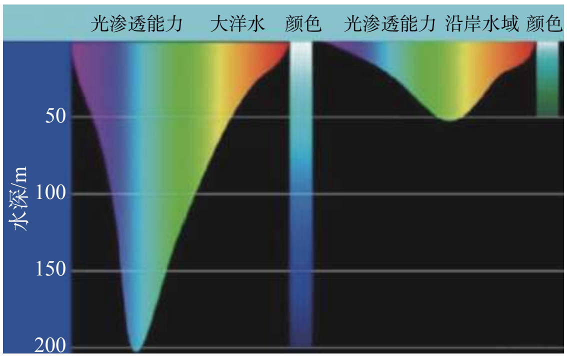


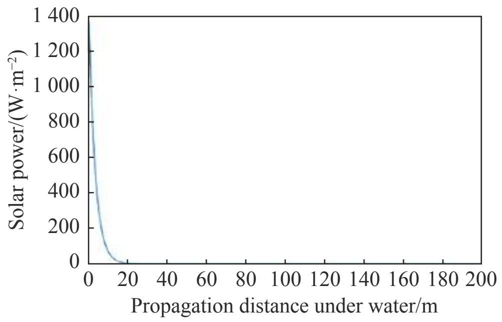
图 2　不同海水深度的太阳光渗透能力分布图

Fig. 2　Distribution map of sunlight penetration capacity at different sea depths

设 P_0 为太阳光到达水面的光功率, 按世界气象组织 1981 年公布的太阳常数值[13-14], P_0 = 1 368 W/m^{2}分别取沿海水域的衰减系数 α = 0.305 m^{-1}和清澈海水衰减系数α = 0.15 m^{-1}, 传输了 L 路程后的光功率 P 可表示为:

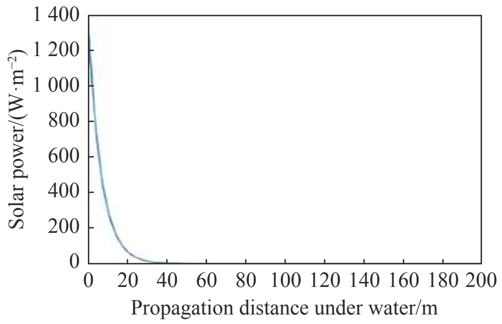
$$P = P_0 e^{-\alpha L} \quad . \tag{5}$$

可以看出光功率在水中成指数衰减, 450 nm 波长的光的衰减曲线如图 3 所示。



(a) α=0.305 m^{-1} 沿海水域太阳光功率衰减曲线

(a) Attenuation curve of solar power in coastal water when α=0.305 m^{-1}



(b) α=0.15 m^{-1} 清澈海水太阳光功率衰减曲线

(b) Attenuation curve of solar power in pure seawater when α=0.15 m^{-1}

图 3　太阳光功率在不同水域中随水面下传播距离衰减曲线

Fig. 3　The attenuation curve of solar power vs. propagation distance under water in different water areas

从图 3 中可以看出, 在沿海水域中, 当太阳光

传输至水面下 20 m 左右时，其光功率几乎衰减殆尽，水深大于 20 m 时，太阳光产生的背景光噪声就可忽略不计了；而在清澈的海域中，太阳光能传输至水下 40 m 左右，水深大于 40 m 时，太阳光产生的背景光噪声几乎消失。

2.3.2 生物荧光的影响

对于海洋生物而言，生物荧光主要出现在少数鱼类、刺丝胞动物、节肢动物等生物体内[15]。海洋是一个相对稳定的环境，遍布着蓝色光线，随着海水深度的增加，除了高能量的蓝光，可见光谱中的大部分光都被吸收了。海洋中的荧光生物虽然存在，但并不多见，对水下无线光通信和水下成像产生影响的概率也微乎其微。

3 系统总体方案设计

系统总体设计遵循 3 个主要原则：大束散角、大功率 LED 拼接阵列、大口径接收光学天线。光学接收天线应具有高接收功率、高信噪比、宽视场角、小型化、低成本等特点[16-17]。如果使用传统透镜作为接收天线，在实现大口径的同时，其焦距也会变得很长，不利于系统总体轻小型化的设计。本系统突破性地选用菲涅耳透镜作为光学接收天线。菲涅耳透镜应用衍射光学的设计，其光学增益远超于同口径的传统聚焦透镜，同时，还可以实现大数值口径，即使通光口径很大，但透镜的焦距也不会很大，这就满足了系统轻小型化的需求[18-20]。

系统总体设计框图如图 4 所示，发射单元主要包括 LED 光源、LED 驱动电路、FPGA 和信号处理模块。FPGA 主要将数据转化为 LVTTL 的电平格式加载至驱动电路；由驱动电路完成 OOK 调制，并同时驱动 4 路 LED；通过调节电压的大小进而调节 LED 光功率的强弱，其控制电压范围为 0~3 V。电压转换模块将 12 V 直流接入电压分别转换为 4.5 V、5 V，分别为 LED 驱动电路和 FPGA 信号处理模块供电。接收单元主要包括光学天线、探测器、A/D转换器以及信号处理器。探测器选用 3 mm 的 APD 探测器，在 APD 前放置一 75 mm 口径的菲涅耳透镜作为光学接收天线，以收集尽可能多的信号光，A/D 转换器将接收到模块电信号转换为数字电信号，随后传输到信号处理单元，输出信号。

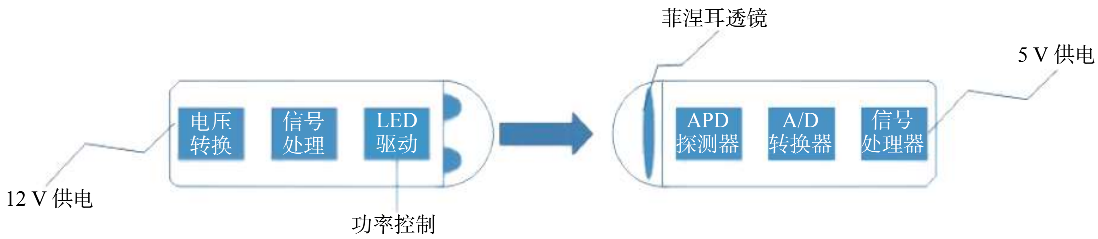


图 4 系统总体设计框图

Fig. 4 Block diagram of overall system design

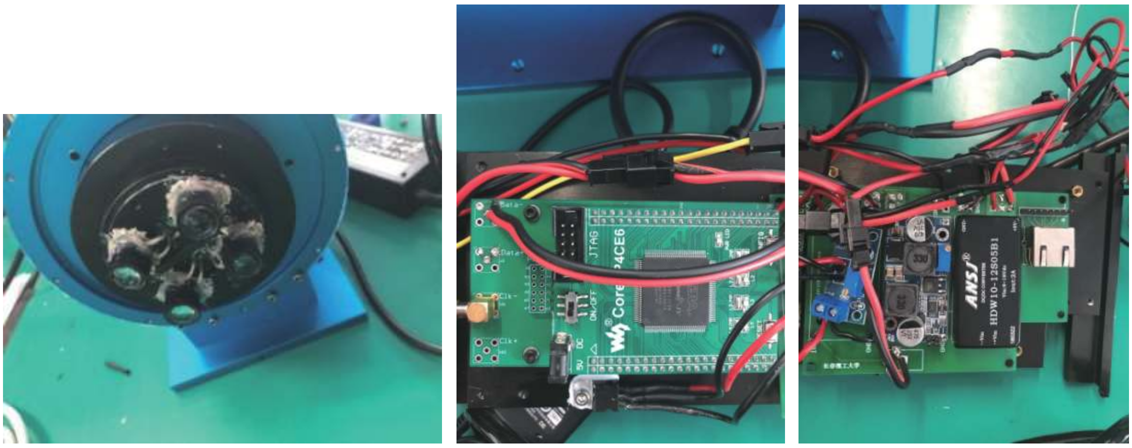
4 系统主要结构设计

系统主要结构包括发射光端机和接收光端机。

4.1 发射光端机

由于单个 LED 难以满足系统对发射功率的需求，因此系统采用多个 LED 拼接，组成 LED 阵列，其排布示意图如图 5(a) 所示。相应的信号处理模块如图 5(b) 所示。在 10 Mbit/s 的工作条件下，单个 LED 发光功率约为 300 mW，则整个 LED 阵列的出射功率在 1 W 以上，能够满足系统的要求。

发射光端机的主要结构器件如图 5 所示，发射光源选用的是 Lumileds 公司的 LED，中心波长为 470 nm，单个灯珠的发光功率约为 300 mW，发散角为 120°，4 个 LED 组成一个光源阵列，加装灯罩进行光束整形后，输出近似平行光，可保证信号光光功率足够大。电压转换模块 (见图 5(c)) 将输入的 12 V 直流电压分别转换为 5 V，为负责信号处理的 FPGA 供电，以及转换为 4.5 V，为 LED 驱动电路供电。系统调制方式选择 OOK(开关键控)调制模式，信号处理单元将 5 MHz 伪随机码加载到已调制信号光中发出。加装机械外壳后的发射光端机实物图如图 6 所示。



(a) 发射光源 LED 及供电模块
(a) Emitting light source LED and power supply module

(b) 信号处理模块
(b) Signal processing module

(c) 电压转换模块
(c) Voltage conversion module

图 5　发射光端机主要结构器件

Fig. 5　Main structural components of the optical transmitter

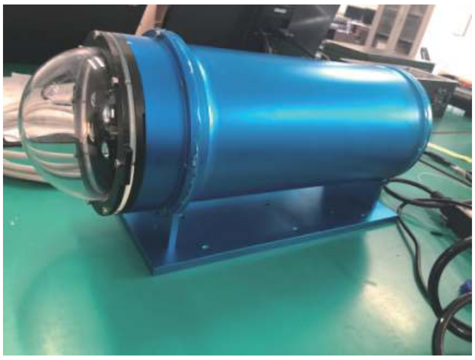


图 6　发射光端机实物图

Fig. 6　Physical image of the transmitter

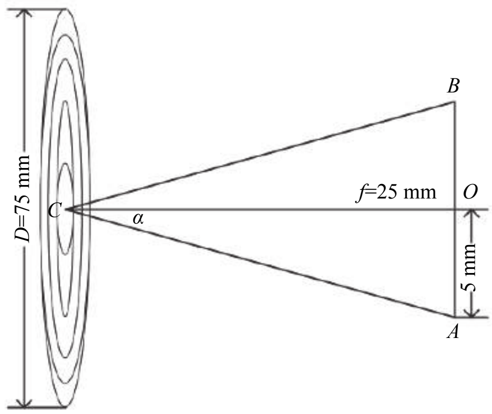


图 7　菲涅耳透镜直径、焦距与光线入射角的关系示意图

Fig. 7　Relationship between the Fresnel lens diameter, focus distance and incident angle

4.2　接收光端机

为了最大限度提高接收系统的灵敏度，水下无线光单工通信实验样机的光学接收单元应同时满足大视场和大通光口径要求，本系统中视域形成是由菲涅耳透镜成像实现的[21]。

图 7 所示的是菲涅耳透镜尺寸及焦距与光线入射角度之间的关系，APD 探测器靶面尺寸为 10 mm×10 mm，菲涅耳透镜的口径与焦距比 D/f 选为 3∶1，当经菲涅耳透镜的光线完全布满探测器靶面时，利用三角函数计算公式可得：

$$\tan\alpha = \frac{OA}{OC} = \frac{OA}{f}. \tag{6}$$

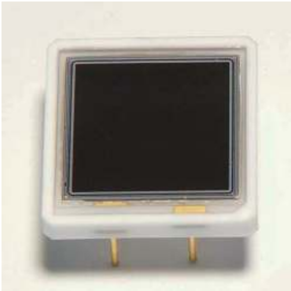
当入射角α=30°时，$f \approx 8.66$ mm，D=25.98 mm；当入射角α=20°时，$f \approx 13.7$ mm，D=41.1 mm；当入射角α=17.5°时，$f \approx 15.8$ mm，D=47.4 mm；当入射角α=15°时，$f \approx 18.6$ mm，D=55.8 mm。

综合考虑视场角、天线增益以及窄带滤光片安装等因素，系统采用焦距为 25 mm、口径为 75 mm 的菲涅耳透镜作为光学天线，相应的α=11.31°，即光线以小于 11.31°角入射至菲涅耳透镜表面时，可以被完全耦合到 APD 探测器上。

接收光端机主要结构器件如图 8 所示。接收单元以菲涅耳透镜作为光学天线，直径为 75 mm，有效口径为 3，可保证大视场接收效果。探测器选用的是滨松公司型号为 S8664-1010的 APD 探测器，有效探测区域面积为 10 mm×10 mm。将探测器安置在菲涅耳透镜的焦点处，信号光经菲涅耳透镜会聚后聚焦在探测器靶面上，以保证探测器尽可能多地收集有效信号光。A/D 转换器选用的是 ALINX 的 AN108 A/D 模块，A/D 转换模块及 FPGA 将加载在通信光中的信号进行数模转换并进行解调处理，最后输出所需的信号。图 9 为

接收光端机实物图。

(a) 菲涅耳透镜
(a) Fresnel lens



(b) APD 探测器
(b) APD detector

(c) A/D 转换模块
(c) A/D conversion module

(d) 信号处理模块
(d) Signal processing module

图 8 接收光端机主要结构器件

Fig. 8 Main structural components of the optical receiver

图 9 接收光端机实物图

Fig. 9 Physical map of the receiver

发射与接收单元的光端机球罩选用的是防水耐压亚克力材质的半球形球罩，可承受水深约为 100 m，光端机外壳加防水镀层，连接处均采用密封胶圈压实，线缆选用的是防水线缆，其与端机后盖连接处均用防水密封胶进行密闭处理，以保证端机的防水性。

5 系统测试

5.1 测试环境

测试地点选在某泳池，如图 10 所示，水质清澈，水池深 1.3 m，满足水下通信需求。发射光端机与接收光端机分别装在三脚架上，将三脚架沉入池中，距离 20 m。

图 10 水下实验环境

Fig. 10 Underwater experimental environment

5.2 测试过程

首先将光端机固定在三脚架上，随后测量好距离，将三脚架沉入池中，以水平面为基准，调整垂直高度，使两台光端机处于同一高度，随后以水池壁为基准，使两台光端机左右方向近似处于同一平面。接入电源后，测定误码率，记录输出信号波形。测试结果如图 11~12 所示。

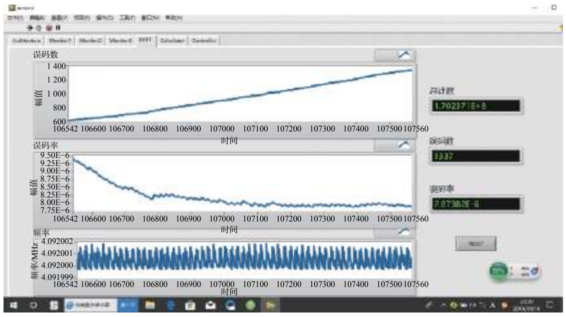


图 11 水下距离 20 m 处系统通信误码率

Fig. 11 BER of the system at 20 m underwater

图 12 水下距离 20 m 处系统输出波形及通信速率

Fig. 12 Output waveform and communication rate of the system at 20 m underwater

由实验结果可见，在水下 20 m 距离时，该系统通信速率可达 5 Mbit/s，误码率为 7.9×10^{-6}，误码率性能良好，输出波形稳定，可满足数据传输要求，成功实现水下 20 m 通信。

6　结　论

本文设计了一种基于可见光（蓝光）LED 的水下无线光通信系统，介绍了系统的硬件及软件设计，并成功完成了样机的组装与测试。测试结果表明，当该系统在水下进行通信时，通信距离为 20 m，系统误码率为 7.9×10^{-6}，通信速率为 5 Mbit/s，验证了该系统样机在水下环境可进行稳定的图片、文字等信息传输，为之后水下无线可见光动态通信系统的研制奠定了理论及工程基础，相信在不久以后，即可实现更远距离、更高速率的稳定动态水下无线可见光通信。

参考文献：

[1] 姜洋，全向前，杜杰，等. 全海深大视场超高清光学系统设计[J]. *光学 精密工程*，2019，27(11)：2289-2295.
JIANG Y, QUAN X Q, DU J, *et al*.. Design of deep-sea optical imaging system with wide field of view and ultra-high resolution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11): 2289-2295. (in Chinese)

[2] 吴天琦，王睿扬，王超，等. 单模光纤章动跟踪耦合系统设计[J]. *液晶与显示*，2020，35(1)：62-69.
WU T Q, WANG R Y, WANG CH, *et al*.. Design of single mode fiber optic nutation tracking coupling system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 62-69. (in Chinese)

[3] 吴厚德，侯昱辰，许文海，等. 水下自主航行器微光照相机驱动系统设计[J]. *光学 精密工程*，2018，26(10)：2605-2613.
WU H D, HOU Y CH, XU W H, *et al*.. Design of driving system for AUV low-light level camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2605-2613. (in Chinese)

[4] 赵英俊，王江安，任席闯，等. 舰船激光通信中大气湍流对系统误比特率的影响[J]. *激光技术*，2010，34(2)：261-264.
ZHAO Y J, WANG J A, REN X CH, *et al*.. Effect of the atmospheric turbulence on the bit error rate of laser communication among the ships[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 261-264. (in Chinese)

[5] HARNON S. Underwater optical wireless communication network[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(1): 015001.

[6] 易森，李天松，陈名松，等. 激光通信系统中多脉冲位置调制帧同步的实现[J]. *激光技术*，2010，34(2)：164-167.
YI M, LI T S, CHEN M S, *et al*.. Frame synchronization for multi-pulse position modulation in optical communication[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 164-167. (in Chinese)

[7] 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.

[8] SHEN CH, GUO Y J, OUBEI H M, *et al*.. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25502-25509.

[9] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518-1547.

[10] BUKATA R P, JEROME H, KONDRATYEV A S, *et al*.. *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*[M]. Crc Press, 1995.

[11] HULBURT E O. Optics of distilled and natural water[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1945, 35(11): 698-705.

[12] SMITH R C, BAKER K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm)[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 177-184.

[13] 张佳琦，齐瑾，方伟，等. 太阳辐射监测仪观测角度变化的修正[J]. *光学学报*，2011，31(2)：0212003.
ZHANG J Q, QI J, FANG W, *et al*.. Correction of observation angle in solar radiation monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0212003. (in Chinese)

[14] WILLSON R C. Solar total irradiance observations by Active Cavity Radiometers[J]. *Solar Physics*, 1981, 74(1): 217-229.

[15] 赵熙熙. 科学家首次证明生物荧光普遍存在于动物界[EB/OL]. [2019-06-15]. http://news.sciencenet.cn/htmlpaper/20141131021060331633.shtm.
ZHAO X X. Scientists have proved that bioluminescence is ubiquitous in the animal kingdom for the first time[EB/OL].

[2019-06-15]. http://news.sciencenet.cn/htmlpaper/20141131021060331633.shtm. (in Chinese)

[16] 李湘. 基于LED的室内可见光通信菲涅尔光学接收天线的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
LI X. Study on the Fresnel lens as an optical antenna of LED-based indoor visible light communication[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[17] 徐宁, 徐丹彤, 杨庚, 等. 可见光通信中菲涅耳透镜仿真设计与优化[J]. 量子电子学报, 2012, 29(5): 629-636.
XU N, XU D T, YANG G, *et al*.. Simulating and optimizing of Fresnel lens in visible light communications[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(5): 629-636. (in Chinese)

[18] 汪广业, 王金鹏, 杨娜, 等. LED光通信中高聚光性菲涅尔透镜的设计[J]. 光通信技术, 2015, 39(8): 12-15.
WANG G Y, WANG J P, YANG N, *et al*.. Design of high light gathering efficiency Fresnel lens in LED optical communication systems[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(8): 12-15. (in Chinese)

[19] 李林, 黄一帆. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
LI L, HUANG Y F. *Applied Optics*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)

[20] 吴楠, 杨爱英, 冯立辉, 等. 可见光通信中光学天线的研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(2): 151-158.
WU N, YANG A Y, FENG L H, *et al*.. Research of optical antenna technology in visible light communication[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology* (*Natural Science Edition*), 2017, 9(2): 151-158. (in Chinese)

[21] 闵森林, 王元庆. 基于菲涅尔透镜的新型立体显示系统[J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 306-309.
MIN S L, WANG Y Q. New stereoscopic display system based on Fresnel lens[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(3): 306-309. (in Chinese)

作者简介:

董　冰(1990—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 2016年于长春理工大学获得物理电子学硕士学位, 现为长春理工大学光学工程专业博士研究生, 主要从事水下无线光通信方面的研究。E-mail: 279884056@qq.com

佟首峰(1972—), 男, 吉林洮南人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事空间激光通信, 空间光学遥感, 光电检测和光电跟踪等方面的研究。E-mail: tsf1998@sina.com