

基于高灵敏度探测器的水下光通信系统

陈姝 祁攀 管朝鹏 王俊涛 沈天浩 艾勇

Underwater optical communication system based on high sensitivity detector

CHEN Shu, QI Pan, GUAN Chaopeng, WANG Juntao, SHEN Tianhao, AI Yong

引用本文:

陈姝, 祁攀, 管朝鹏, 等. 基于高灵敏度探测器的水下光通信系统[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 929–936. DOI: 10.5768/JAO202546.0408001

CHEN Shu, QI Pan, GUAN Chaopeng, et al. Underwater optical communication system based on high sensitivity detector[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 929–936. DOI: 10.5768/JAO202546.0408001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0408001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高灵敏度微位移零差干涉方法

High sensitivity micro-displacement homodyne interferometry

应用光学. 2022, 43(1): 74–80 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103001>

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

应用光学. 2023, 44(2): 462–468 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002>

信道复用技术在LED水下可见光通信中的应用

Application of channel multiplexing technology in LED underwater visible light communication

应用光学. 2023, 44(5): 1133–1141 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0508002>

非正交多址光通信系统信道均衡的虚拟时反方法

Virtual time reversal method for channel equalization in non-orthogonal multiple access optical communication systems

应用光学. 2024, 45(2): 475–484 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208005>

小型化长出瞳距激光通信接收望远镜光学设计

Optical design of miniaturized laser communication receiving telescope with long exit pupil distance

应用光学. 2023, 44(5): 975–981 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501005>

水下光场的蒙特卡罗法求解

Monte Carlo method for solving underwater light field

应用光学. 2023, 44(2): 268–274 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 04-0929-08

引用格式: 陈姝, 祁攀, 管朝鹏, 等. 基于高灵敏度探测器的水下光通信系统 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 929-936.

CHEN Shu, QI Pan, GUAN Chaopeng, et al. Underwater optical communication system based on high sensitivity detector [J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 929-936.



在线阅读

基于高灵敏度探测器的水下光通信系统

陈姝¹, 祁攀¹, 管朝鹏¹, 王俊涛¹, 沈天浩², 艾勇^{2,3}

(1. 核动力运行研究所 在役检查中心, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉六博光电技术有限责任公司, 湖北 武汉 430000;
3. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 目前, 水下高速无线光通信技术已成为水下无线数据通信的研究热点, 受到越来越多的学者青睐。针对水下光通信远距离、易于对准的技术难点, 基于蓝绿发光二极管 (LED) 光源, 设计实现了一种大接收视场角度与高灵敏度探测电路的水下光通信系统: 发射光功率达到 1.2 W, 接收视场角度大于 60°, 探测灵敏度优于 -60 dBm。对原理工程样机进行测试, 结果显示: 在水质衰减度为 0.85 dBm·m⁻¹ 的水域环境, 系统可实现文字、图片、实时视频数据流的高速传输等功能, 数据传输速率为 10 Mb/s, 通信距离为 40 m, 通信误码率为 0。

关键词: 水下光通信; 高灵敏度; 大视场接收; 大功率调制

中图分类号: TN929

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0408001

Underwater optical communication system based on high sensitivity detector

CHEN Shu¹, QI Pan¹, GUAN Chaopeng¹, WANG Juntao¹, SHEN Tianhao², AI Yong^{2,3}

(1. Nuclear Power Operations Research Institute Service Inspection Center, Wuhan 430000, China; 2. Wuhan Liubo Photoelectric Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 3. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: At present, the underwater high-speed wireless optical communication technology has become the research hotspot of underwater wireless data communication, which is favored by more and more scholars. Aiming at the technical difficulties of long distance and easy alignment of underwater optical communication, an underwater optical communication system with large receiving field of view angle and high sensitivity detection circuit based on blue-green light emitting diode (LED) light source was designed and realized. In this proposed system, the transmitting optical power reaches 1.2 W, the receiving field of view angle is more than 60°, and the detection sensitivity is better than -60 dBm. Through the test of principle engineering prototype, the results show that in the water environment with water quality attenuation degree of 0.85 dBm·m⁻¹, the proposed system can realize the high-speed transmission of text, pictures, real-time video data streams, etc. The data transmission rate is 10 Mb/s, the communication distance is 40 m, and the communication bit error rate is zero.

收稿日期: 2024-08-23; 修回日期: 2024-09-24

基金项目: 湖北省重点研发计划基金 (2023BAB009)

作者简介: 陈姝 (1983—), 女, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事核工业智能机器人、无线通信技术研究。

E-mail: chenshu@cnp.com.cn

通信作者: 祁攀 (1982—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事核电站电磁无损检测评估技术开发与配套装备研制, 水下智能机器人应用研究。E-mail: qipan_2024@163.com

Key words: underwater optical communication; high sensitivity; large-field reception; high power modulation

引言

随着海洋的探索与开发日益增加,人们对水下高速传输无线通信技术的需求越来越多。目前,水下光通信具有通信速率高、传输距离较远、功耗低、体积小、保密性好等优点,因此受到众多研究学者的青睐^[1-2]。2016年,AL-RUBAIAI M等研究人员^[3]采用开-关键控(OOK)调制的蓝光发光二极管(LED)水下光通信系统,实现了通信距离为23 m,通信速率为115.2 kb/s的数据传输。2018年,中国科学技术大学的王培林等人^[4]设计了基于蓝光LED的水下光通信系统,并采用可编程门阵列(FPGA)进行编码处理,在调制方式上选择OOK调制技术,实现了通信距离为10 m,通信速率达到25 Mb/s的通信指标。2018年,中国科学院西安光学精密机械研究所的韩彪等人^[5]采用472 nm LED作为光源,将OOK技术与RS编码技术相结合,实现通信速率为20 Mb/s,通信距离为9.6 m的数据传输。2019年,中国科学院研究团队^[6]采用自由曲面透镜实现LED阵列为150°大发散角度,经测试通信距离为8 m,通信速率为19 Mb/s。2020年,ARVANITAKIS GN等人^[7]采用6颗450 nm LED阵列,接收端通过光电二极管PIN管作为光电转换器件,在误码率为 1.5×10^{-3} 的条件下,实现了通信速率为4.92 Gb/s,通信距离为1.5 m的数据传输。2021年,武汉六博光电技术有限责任公司推出了水下无线光通信商用设备^[8],根据资料显示,该设备在水下通信距离为50 m时的通信速率为3 Mb/s。2021年,长春理工大学的董冰等人^[9]采用470 nm LED阵列拼接结构与菲涅尔透镜,经测试在水下通信距离为20 m时,通信速率可达到5 Mb/s,通信误码率为 7.9×10^{-6} 。2022年,KONG M W等人^[10]采用458 nm LED作为光源,利用扩散视距技术,在1.5 m纯水、 $1.53 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 气泡诱导湍流条件下,实现了通信速率为2.5 Mb/s的实时视频传输。2022年,西安理工大学的柯熙政教授团队^[11]利用蓝绿LED光源,提出了一种双层复眼透镜接收天线技术,与单层复眼透镜技术相比,该技术在通信距离为1 m、3 m、5 m时,接收光功率的效率分别提高了72%、65%、60%。由于水下环境的复杂性,光在水下传输的距离增加,导致其衰减以指数级增大,为了延长通信距离,通常采用增加发射光功率,提升接收灵敏度,减小光学发射角度等方法。

在水下光通信中,光源通常选择激光二极管

(LD)或LED,LD具有通信速率高,发射角度小,但通信需要精确对准的特点,在水下操作时存在一定的困难。LED发散角度大,易于水下操作与对准,但其结电容大导致通信速率较低。综上所述,目前针对水下高速与短距离研究较多,而由于水下环境的复杂性与水下对较远距离及易于操作对准等需求,导致实用性较低。本文采用LED作为通信光源,接收端采用高灵敏探测器接收光信号,通过电路设计将其探测灵敏度提高到 -60 dBm 以上,同时动态范围大于30 dB。并制作了工程样机,在误码率为0的条件下,水下最远通信距离为40 m,通信速率为10 Mb/s,能完整传输实时视频、图片等数据流。

1 系统总体方案设计

水下光通信系统主要由信源、发射端、接收端、信宿四部分组成,如图1所示。发射端首先经过以太网模块接收来自信源的数据,并将其传输到信息处理模块中,信息处理模块选用FPGA作为主控核心,实现对数据的编码、帧同步、位同步、并串转换等处理后,以LVTTTL电平信号输入到LED调制电路中,主要实现将电信号加载到光载波上,可以实现光信号传输信息。常规LED发散角度为 120° ,在LED阵列前加入发射光学系统,可以缩小LED发散角度,增强光信息传输的方向性,使其能传输到更远的距离。接收端光学系统主要由滤光片和非球面透镜组成,将光信号聚焦到光电倍增管上,实现光信号转换为电信号的功能,经过信号处理模块放大与整形为LVTTTL电平信号,输入到信息处理模块中进行判决、串并转换、译码等处理,再通过以太网模块将信息传输到信宿中处理或显示。

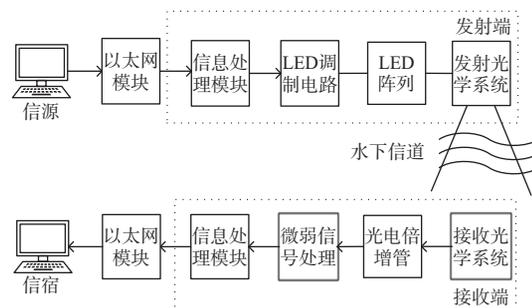


图1 系统总体方案设计

Fig. 1 Overall scheme design of system

1.1 LED 调制电路设计

为保证水下光通信设备较远距离传输,设计水下光通信设备的发射光功率为 1.2 W。根据测试单颗 LED 的发射光功率约为 200 mW,采用 6 颗 LED 阵列式排布。蓝光 LED 采用 Cree 公司生产的 XPEBRY-L1-0000-00L02 型号灯珠,绿光 LED 型号为 XPEBRY-L1-0000-00F02。该系列灯珠体积小,发射光功率较大,因此采用这款 LED 作为通信光源,在设计中也可以选用其他商用 LED 作为光源。其中 LED 的典型工作电压约为 3.7 V,最大工作电流为 1 A,根据 LED 调制特性,光功率越大,调制速率越低,为使得 LED 通信速率达到 10 Mb/s,实际工作电流约为 500 mA,单颗 LED 电功耗约为 1.7 W。由于光源属于电流型驱动器件,随着驱动电流的增大,其光源驱动信号的上升沿越陡峭,当较高速率信号加载到光源时,受到结电容的影响,出现光信号下降沿缓慢和响应时间延迟的特性,最终导致大功率光源响应速率远小于小功率光源速率。因此在发射端中,LED 调制电路设计采用 10.2 W 的大功率 LED 光源是至关重要的。LED 调制模型主要由信号处理、高速开关 NMOS(N-metal-oxide-semiconductor)管、直流电源(DC)三部分组成,如图 2 所示。

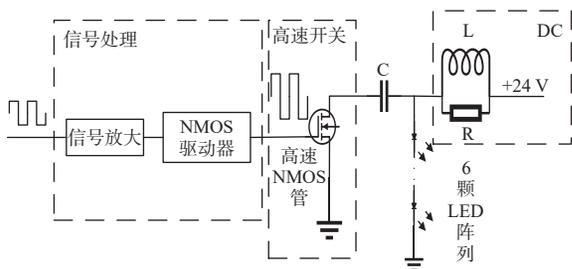


图 2 LED 调制电路模型图

Fig. 2 LED modulation circuit model

1.2 微弱信号处理电路设计

接收端采用高灵敏度的光电倍增管(PMT)作为探测器,其型号为 H14447,光敏面直径为 25 mm,响应度为 $80 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ (在 420 nm 测试条件下)。为了增大水下光通信的通信距离,光电倍增管配合微弱信号处理电路组成接收端信号处理模块,其中灵敏度是衡量接收端信号处理模块重要的性能指标之一。当接收端信号处理模块的灵敏度越高,能探测的光信号能量越弱,水下通信距离越远。本文提出一种微弱信号处理电路模型,如图 3 所示。该电路主要由跨阻放大模块,自动增益模块、整形模块组成。其中跨阻放大模块以跨阻放大器(TIA)芯片为核心,搭配相应处理电路组成,

实现将光信号照射在 PMT 的电流信号转换为电压信号的功能。半波检测器与两个可变增益放大器(VGA)放大器组成两级自动增益放大电路,用于对微弱电信号进行放大。其中半波检测器主要用于检测 VGA 放大器输出的幅度,经过处理后将其反馈输入到 VGA 放大器中,使得 VAG 可根据该幅度进行判决,从而调节控制输出幅度相对恒定,最后经过比较器电路整形,输出 LVTTTL 电平信号。

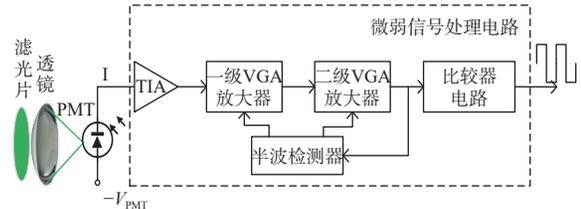


图 3 微弱信号处理电路模型

Fig. 3 Weak signal processing circuit model

本设计中采用二级自动增益电路实现高灵敏度信号探测,同时增大探测器的动态范围。自动增益放大器选用 AD603 芯片,AD603 具有 3 种增益模式可选,其中高增益放大倍数为 10 dB~50 dB,中增益放大倍数为 0~40 dB,低增益放大倍数为 -10 dB~30 dB^[12]。本设计中光信号探测灵敏度约为 -60 dBm(1 nW),光电倍增管的响应度为 $80 \text{ mA} \cdot \text{W}$,内部增益设为 2×10 ,跨阻增益设置为 10 k Ω ,VGA 放大增益 $\geq 60 \text{ dB}$ 。在设计时需保留一定的余量,因此选用自动增益中的增益放大模式,满足设计需求。

1.3 实验测试

将上述 LED 调制电路原理与微弱信号处理电路原理相结合,设计相应的电路,绘制电路原理图,制板并焊接调试,其实物图如图 4 所示。



(a) LED 调制电路实物图



(b) 微弱信号处理电路板

图 4 电路板实物图

Fig. 4 Physical drawing of circuit board

将LED调制电路板信号输入端接上FPGA信息处理模块,并发送10 MHz无序方波信号源,另一端接入6颗LED光源,发射光源与接收处理模块间隔距离为0.5 m。接收处理模块中光电转换器件采用光电倍增管,该器件将光信号转换为电信

号后输入到微弱信号处理板中进行处理,输出信号接入示波器(DSO81304B)中观测其眼图,同时在接收端不停加入蓝绿光衰减片,对光信号的光能量不停衰减,从而测试其整体系统的灵敏度。灵敏度测试图如图5所示。

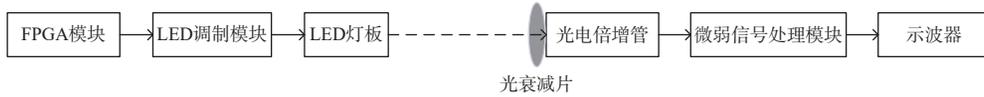


图5 灵敏度测试图

Fig. 5 Sensitivity test diagram

FPGA模块将数据源信息进行8 B/10 B编码,然后将编码后的数据流以LVTTTL电平信号方式输入到LED调制模块中,从而实现电信号加载到LED上。在经过空间0.5 m链路后光功率约为5 dBm,加入35 dB的光衰减片后,其光功率约为-30 dBm,观察示波器的眼图,结果如图6(a)所示。可看出在该光功率条件下,10 Mb/s通信眼图扩张明显,表明其通信质量较优。加入65 dBm的光衰减片后,其光功率约为-60 dBm,观察其眼图,如图6(b)所示。对比光功率为-30 dBm的眼图质量,-60 dBm时眼图质量变得较差,将其接入信息处理模块后也可正常通信。将通信距离调整至1 m和1.5 m,重复上述测试,探测器在-60 dBm以

下眼图质量良好。上述实验表明:该系统接收探测灵敏度小于-60 dBm,动态范围大于30 dB,可用于保障较远距离的水下光通信。

1.4 接收光学设计

在水下光通信中,光通信发射设备与光通信接收设备之间的对准是至关重要的,为降低光通信设备的对准难度,在设计过程中往往需要考虑大视场角度的光学方案。视场角度由接收光学透镜视场角度 ω_1 与光电探测器视场角度 ω_2 两个部分组成,设计中往往要求 $\omega_1 > \omega_2$ 。 ω_1 的表达式为^[13]

$$\omega_1 = 2 \arctan \frac{D}{2F} \quad (1)$$

式中: D 为接收光学透镜的直径; F 为透镜的焦距。本设计中接收光学透镜直径 D 为27 mm,焦距 F 为20 mm,因此可计算出 ω_1 约为68.04°。

光电探测器视场角度主要由接收光学透镜的焦距 F 与光敏面半径 R 决定,其关系为^[14]

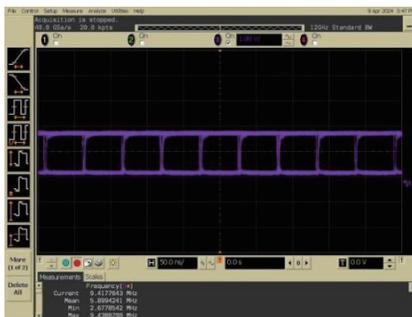
$$\omega_2 = 2 \arctan \frac{R}{F} \quad (2)$$

式中 $R = 12.5$ mm,可计算出光电探测器视场角度 ω_2 约为64°。为了满足 $\omega_1 > \omega_2$ 的设计要求,要求接收光学系统的视场角度约为64°,可实现水下易于对准的要求。设LED发射光功率为1.2 W,发散角为40°,通信距离为40 m,根据上述参数,利用Lighttools光学软件对接收视场角度进行仿真分析验证,结果如图7所示。图7(a)为接收视场角度仿真结果,通过仿真可得出视场角度 $>60^\circ$ 。同时对光功率进行仿真,仿真结果如图7(b)所示,40 m时的光功率约为-54.6 dBm,探测器的灵敏度约为-60 dBm,满足通信要求。

根据上述设计,选择LED对应波段为450 nm和520 nm的滤光片,焦距为20 mm的可见光透镜,将25 mm光敏面光电倍增管放到透镜焦距上,完



(a) 光功率为-30 dBm的接收眼图



(b) 光功率为-60 dBm的接收眼图

图6 不同灵敏度下眼图

Fig. 6 Eye images with different sensitivities

成接收端光学设计,其实物图如图8所示。

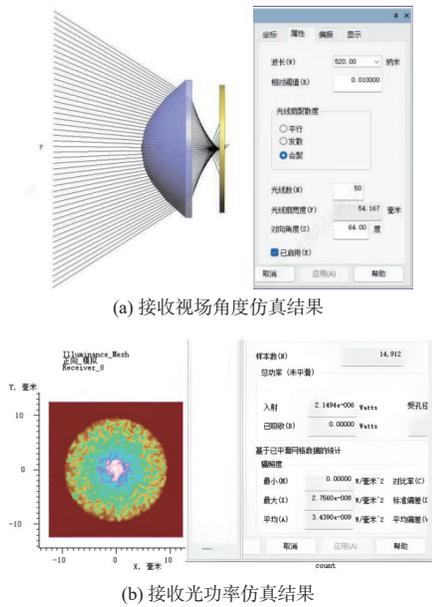


图7 接收端仿真测试结果

Fig. 7 Simulation test at the receiving end



图8 端接收光学实物设计

Fig. 8 Physical design of receiving optics

2 水下传输信道模型分析

研究表明,在不同的水域环境下,水质对不同波段的光衰减系数也不相同,其衰减系数如表1所示^[15]。

表1 不同海域下的光传输衰减系数

Table 1 Attenuation coefficients of optical transmission in different sea areas

海水类型	衰减/(dB·m ⁻¹)	衰减系数/m ⁻¹
特别清澈的海水	0.09~0.13	0.02~0.03
公海的海水	0.17~0.3	0.04~0.07
大陆架的海水	0.39~0.45	0.09~0.12
海滩的海水	0.65~0.75	0.14~0.18
近海和港口的海水	1.38~1.75	0.37~0.43

在水下光通信中,除了水质衰减系数外,光源发射光功率、光源发散角度、探测灵敏度、接收口

径等因素均会影响通信距离,本设计通过建立水下光通信链路模型展开分析,如图9所示。

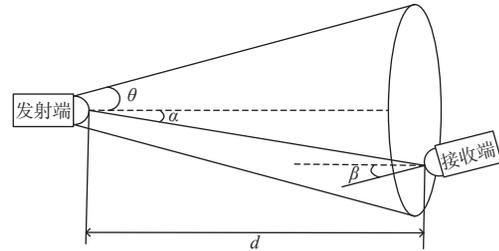


图9 水下光通信信道模型

Fig. 9 Underwater optical communication channel model

图9中假设发射端与接收端相隔 d m,同时设发射光源发射半角为 θ ,接收端设备与发射端设备的水平偏移角度为 α ,接收端相对于水平方向的偏移角度为 β 。根据以上参数,结合设计参数,可计算出接收端的光信号功率^[16]:

$$P_r = P_T \eta_T \eta_r e^{-c(\lambda) \frac{d}{\cos(\alpha+\beta)}} \frac{S_r \cos(\alpha+\beta)}{2\pi d^2 (1-\cos\theta)} \quad (3)$$

式中: P_T 表示光源发射光功率; η_T 表示发射端光学系统效率; η_r 表示接收端光学系统效率; $c(\lambda)$ 表示衰减系数; S_r 表示接收口径面积。

实验过程中的水下衰减系数以清澈的海水为参考。根据上述设计内容,整理水下光通信参数如表2所示。

表2 水下光通信系统参数表

Table 2 Parameters of underwater optical communication system

名称	参数值
发射光功率 P_T/W	1.2
发射半角 $\theta/(^\circ)$	30
发射端光学系统效率 $\eta_T/\%$	90
接收光学系统效率 $\eta_r/\%$	80
衰减系数 $c(\lambda)/m^{-1}$	0.14
接收口径 S_r/m^{-2}	0.00018525 π

采用 Matlab 软件仿真光通信系统中偏转角度 $(\alpha+\beta)$ 分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 时对通信距离的影响,结果如图10所示。仿真结果显示:当水下光通信系统发射端与接收端偏转 0° 时,最远通信距离约为 43 m;当发射端与接收端相对偏转 30° 时,最远通信距离约为 37 m;当发射端与接收端相对偏转 60° 时,最远通信距离约为 22 m。

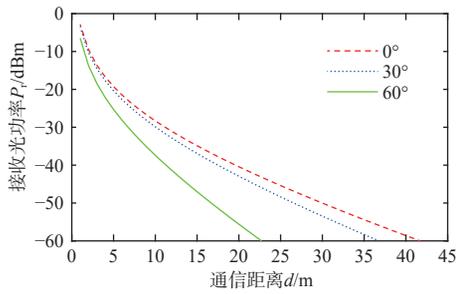
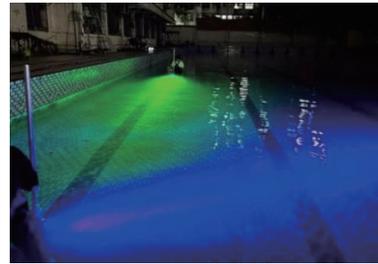


图 10 不同角度下的光通信距离仿真

Fig. 10 Simulation of optical communication distance at different angles



(b) 偏转角度测试图

图 12 工程样机在水下测试图

Fig. 12 Engineering prototype underwater test diagram

3 系统实验测试

按照上述参数与原理设计水下光通信系统,并集成为小体积的工程样机,其体积为 120 mm×180 mm(直径×高度),工程样机设计为收发一体系统,如图 11 所示。



图 11 水下光通信工程样机

Fig. 11 Underwater optical communication engineering prototype

实验测试在游泳池中进行,泳池长 50 m,宽 25 m,深 1 m。将水下光通信系统放在该环境下进行测试,测试场景如图 12 所示。

将一个设备固定在岸边,另一个设备进行不同角度的偏转,观察信息传输的状态,主要通过误码率与图片能否传输成功来验证数据传输的可靠性。水下光通信软件设计界面如图 13 所示,该软件除了能够测试误码率外,还能够传输文字、图片、实时视频等数据流。

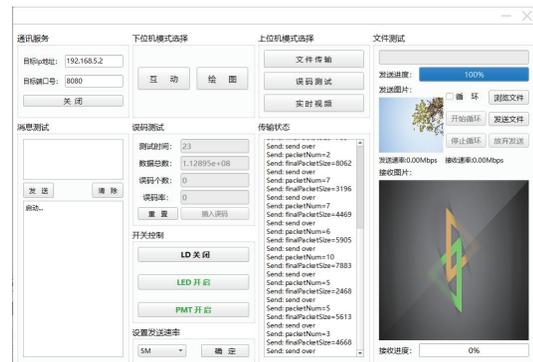


图 13 水下光通信软件设计界面

Fig. 13 Underwater optical communication software design interface

将设备移动到不同距离或偏转角度时,其接收光功率会发生变化,当接收光功率在 -60 dBm 以下时,会产生误码率。经过对水下光通信系统进行测试,在误码率为 0 和 10^{-6} 的条件下,记录分别偏转 0° 、 30° 、 60° 时的通信距离,结果如表 3 所示。将实验测试数据与系统仿真数据进行对比可知,实验数据均小于仿真数据,其主要原因是水质衰减度不同,系统仿真时设衰减系数为 0.14 (约为 $0.65 \text{ dBm}\cdot\text{m}^{-1}$),而实验水质衰减系数经过测试后约为 $0.85 \text{ dBm}\cdot\text{m}^{-1}$,实验水质对光的衰减度大于系统仿真的衰减度,因此导致实验测试距离略小于系

表 3 偏转角度与通信距离间的测试结果

Table 3 Test results between deflection angles and communication distances

偏转角度/ $^\circ$	误码率	传输图片	通信距离/m
0	0	OK	40
30	0	OK	32
60	0	OK	20
0	10^{-6}	丢失	41.2
30	10^{-6}	丢失	32.8
60	10^{-6}	丢失	20.5



(a) 水下通信距离测试图

统仿真的距离。在测试中, 水下实际环境往往比系统仿真环境更加复杂, 如系统在仿真时无法估算环境光对探测器的干扰等, 导致实验结果与仿真结果存在一定的误差。因此在水下光通信系统设计过程中, 往往在理论设计中会冗余约 5 dBm~10 dBm 的光功率, 确保水下光通信系统能够适应复杂的水下环境, 并且在水下通信距离约为 ± 5.9 m 的区间内(在水质衰减度为 $0.85 \text{ dBm}\cdot\text{m}^{-1}$ 条件下)符合误差预期。

4 结论

本文设计了一种基于高灵敏探测器的水下光通信系统, 硬件设计主要包括发射端大功率 LED 驱动技术调制 10 W LED 阵列, 速率可达到 10 Mb/s, 接收端探测灵敏度可达到 -60 dBm 以上, 接收视场角度达到 60° 以上, 并完成工程样机制作。经测试, 在水质衰减度为 $0.85 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 的条件下, 最远通信距离约为 40 m, 而当系统一端偏转角度为 60° 时, 最远通信距离约为 20 m。该水下光通信系统可为后续开展水下数据传输与组网通信奠定基础, 具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 王林宁, 刘鹏展, 胡芳仁, 等. 面向 6 G 网络的水下光通信系统[J]. *移动通信*, 2022, 46(6): 45-51.
WANG Linning, LIU Pengzhan, HU Fangren, et al. Underwater optical wireless communication system for 6 G networks[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(6): 45-51.
- [2] 彭嘉驰, 郭建中, 李燕龙, 等. 信道复用技术在 LED 水下可见光通信中的应用[J]. *应用光学*, 2023, 44(5): 1133-1141.
PENG Jiachi, GUO Jianzhong, LI Yanlong, et al. Application of channel multiplexing technology in LED underwater visible light communication[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(5): 1133-1141.
- [3] AL-RUBAIAI M, TAN Xiaobo. Design and development of an LED-based optical communication system with active alignment control[C]//2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Banff, AB, Canada: IEEE, 2016: 160-165.
- [4] 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.
- [5] 韩彪. 面向深海应用的水下双向无线光通信研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
HAN Biao. Research on underwater bidirectional wireless optical communication for deep-sea applications[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [6] HAN B, ZHAO W, ZHENG Y Q, et al. Experimental demonstration of quasi-omni-directional transmitter for underwater wireless optical communication based on blue LED array and freeform lens[J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 184-190.
- [7] ARVANITAKIS G N, BIAN R, MCKENDRY J J D, et al. Gb/s underwater wireless optical communications using series-connected GaN micro-LED arrays[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1-10.
- [8] 刘润芑, 佟首峰, 张鹏, 等. 水下光通信技术研究[J]. *光通信研究*, 2023 (4): 11-13.
LIU Runpeng, TONG Shoufeng, ZHANG Peng, et al. Research on underwater optical communication technology[J]. *Study on Optical Communications*, 2023(4): 11-13.
- [9] 董冰, 佟首峰, 张鹏, 等. 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.
DONG Bing, TONG Shoufeng, ZHANG Peng, et al. Design of a 20 m underwater wireless optical communication system based on blue LED[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1451-1458.
- [10] KONG M W, GUO Y, ALKHAZRAGI O, et al. Real-time optical-wireless video surveillance system for high visual-fidelity underwater monitoring[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 1-11.
- [11] KE X, YANG S, SUN Y, et al. Underwater blue-green LED communication using a double-layered, curved compound-eye optical system[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 18599-18616.
- [12] 李秀金, 陆洪涛, 朱良春, 等. 基于 AGC 的抗相参压制干扰方法研究[J]. *电光与控制*, 2019, 26(11): 37-40.
LI Xiujin, LU Hongtao, ZHU Genchun, et al. Countermeasure of coherent blanking jamming based on automatic gain control[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(11): 37-40.
- [13] ZAMANI U, JANZEN A W, TORUN R, et al. Omni-directional optical transceiver design techniques for multi-

- frequency full duplex CubeSat data communication[C]//CubeSats and NanoSats for Remote Sensing II. San Diego, USA: SPIE, 2018: 1076915.
- [14] 贺锋涛, 石文娟, 朱云周, 等. 分集阵列式水下激光通信光学接收天线设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 903005.
- HE Fengtao, SHI Wenjuan, ZHU Yunzhou, et al. Design of optical receiving antenna for underwater laser communication based on diversity array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 903005.
- [15] 钟森城. 激光水下目标成像关键技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.
- ZHONG Sencheng. Research on key technologies of laser underwater target imaging[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012.
- [16] ARNON S, KEDAR D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network[J]. *Journal of The Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2009, 26(3): 530-539.

(上接第 724 页)

- [17] 王志恒, 陈晓阳, 陶德华, 等. 低温下酯类油和硅油对微型轴承启动摩擦力矩的影响[J]. *计量与测试技术*, 2018, 45(6): 29-31.
- WANG Zhiheng, CHEN Xiaoyang, TAO Dehua, et al. Effect of ester oil and silicone oil on starting friction torque of miniature bearings at low temperature[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2018, 45(6): 29-31.
- [18] 姜绍娜, 陶德华, 陈晓阳, 等. 低温下润滑剂对微型轴承启动摩擦力矩的影响[J]. *轴承*, 2011(9): 33-35.
- JIANG Shaona, TAO Dehua, CHEN Xiaoyang, et al. Influence of lubricant on starting friction torque of miniature bearings under low temperature[J]. *Bearing*, 2011(9): 33-35.