

双光源水下无线光通信系统的研究与实现

梁赫西¹, 沈天浩^{1*}, 王振亚^{2,5}, 曹 聪^{2,5}, 肖 云³, 艾 勇^{4,5}

- (1. 湖北师范大学, 湖北 黄石 435002;
2. 武汉纺织大学 电子与电气工程学院, 湖北 武汉 430200;
3. 武汉船舶通信研究所, 湖北 武汉 430205;
4. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072;
5. 武汉六博光电技术有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 随着海洋探测研究的不断深入, 水下无线通信技术已成为制约其发展的关键。针对水下高速、远距离无线通信的需求, 设计了一种面向海洋商用的水下双向链路通信系统。系统在发射端采用激光 LD 及 LED 双发射源, 提出了双发射光源的系统设计方案, 并通过设计相应的驱动电路验证了方案的可行性; 在接收端利用 5 mm 大面积 APD 及高灵敏度 PMT 双接收探测器接收光信号, 适用于远距离、高速通信; 系统的信息处理部分由 FPGA 完成, 通过网络通讯方式与 PC 端进行信息交互; 最后完成整个系统设计并进行了商用工程化。开展的水下模拟实验表明, 系统在通信距离 5 m、误码率 10^{-7} 时, 通信速率可达 60 Mbps; 在远距离通信 60 m、误码率 10^{-7} 时, 通信速率达 10 Mbps。

关键词: 水下光通信; 激光 LD; LED; 双向链路通信

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200445

Research and design of underwater wireless optical communication system with dual light sources

Liang Hexi¹, Shen Tianhao^{1*}, Wang Zhenya^{2,5}, Cao Cong^{2,5}, Xiao Yun³, Ai Yong^{4,5}

- (1. Hubei Normal University, Huangshi 435002, China;
2. School of Electronic and Electrical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China;
3. Wuhan Marine Communication Institute, Wuhan 430205, China;
4. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
5. Wuhan Liubo Photoelectric Technology Co. LTD, Wuhan 430000, China)

Abstract: With the deepening exploration of ocean, underwater wireless communication technology has become the key to restrict its development. Aiming at the requirement of high speed and long distance underwater wireless communication, an underwater bidirectional link communication system for marine commercial was designed. The laser LD and LED dual emission light sources were adopted at the transmitting end, the system design scheme of dual emission light sources was proposed, and the feasibility of the scheme by designing the corresponding drive circuits was verified. At the receiving end, 5 mm large-area APD and high-sensitivity PMT

收稿日期: 2020-11-21; 修订日期: 2020-12-16

基金项目: 武汉市科技计划 (2020010602012047)

作者简介: 梁赫西, 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光通信系统。

导师简介: 艾勇, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术及应用和中高层大气物理领域的研究工作。

通讯作者: 沈天浩, 男, 硕士生, 主要研究方向为光通信技术。

dual receiving detector were used to receive optical signals, which were suitable for long-distance and high-speed communication. The information processing part of the system was completed by FPGA, and information interaction was carried out with PC through network communication. Finally, the whole system was designed and commercialized. The underwater simulation experiment shows that the communication rate of the system can reach 60 Mbps when the communication distance is 5 m and the bit error rate is 10^{-7} . The communication rate of the system can reach 10 Mbps when the communication distance is 60 m and the bit error rate is 10^{-7} .

Key words: underwater optical communication; LD; LED; bidirectional link communication

0 引言

目前,水下光通信技术主要采用激光 LD 和 LED 为发射光源,海水对 400~500 nm 波段的蓝光吸收最小,这使得基于蓝光 LED 水下通信系统性能的研究迅速成为热点。2013 年 G.Cossu 和 S.Balestrino 等研究人员完成了 2.5 m、12.5 Mbps、OOK 调制的 LED 水下光通信系统^[1]。2016 年 Mohammed Al-Rubaiai 等研究人员实现了 23 m、115.2 Kbps、OOK 调制的蓝光 LED 水下光通信系统^[2]。近两年来,为了克服普通 LED 调制速率较低的特点,众多学者展开了先进调制格式的研究。2018 年, Wang Peilin 等研究人员采用 OOK 调制方式使蓝色 LED 通信速率达到 0.025 Gb/s,通信距离为 10 m^[3]; Chi Nan 等研究人员采用 PAM8 调制方式使蓝色 LED 通信速率达到 1.5 Gb/s,通信距离为 1.2 m^[4];同年 Chi Nan 等研究人员利用 CAP64-OFDM 调制技术将蓝色 LED 的通信速率提升到 3 Gb/s,其通信距离为 1.2 m^[5]; Wang Fumin 等研究人员采用 64QAM-DMT 调制技术将绿色 LED 的通信速率达到 2.175 Gb/s,通信距离为 1.2 m^[6]; Meng Shi 等研究人员采用 MISO PAM7 调制技术,使 LED 通信速率达到 0.92 Gb/s,通信距离为 2.1 m^[7];2019 年 Chen Ming 等研究人员采用 DMT 调制方式使蓝色 LED 通信速率达到 2.34 Gb/s,通信距离为 1.2 m^[8]。

目前基于先进调制技术的水下光通信系统大多还处于实验室研究阶段,采用复杂调制模式可大幅提高通信速率,但其通信距离短,硬件实现复杂,成本较高,也不利于水下通信机的商用小型化。在水下无线光通信设备工程化方面,2017 年 P.Leon、F.Roland 等学者基于 LED 及光电倍增管,采用 OOK 调制技术,研制的工程样机在浅海开展了测试,通信距离 60 m 时,通信速率达 3 Mbps^[9]。2018 年中国科学院西安光学精密机械研究所基于 LED 的蓝光水下工程样机进行

了海试,传输距离为 20 m,速率为 20 Mbps^[10]。国内在水下光通信系统的工程化应用方面起步较晚,与国外差距较大,大多数研究是针对小功率 LED 水下光通信,但由于小功率 LED 发射功率小,通信距离短等特点,不适用工程光通信领域。文中基于 OOK 调制原理,利用分立元件搭建了大功率 LED 驱动电路,同时结合小功率 LD 通信高速率特点,设计出了双发射端及双接收端的水下光通信工程样机。该样机在发射端使用了大功率 LED 和小功率 LD 双发射光源,在接收端采用了 APD 和 PMT 双接收光信号,其中大功率 LED,可选用 PMT 接收光信号,用于水下远距离低速率通信,小功率 LD 可选用 APD 接收光信号,用于水下近距离高速率通信。用户可根据通信距离的需求通过上位机对 FPGA 控制自由切换接收方式。经水下试验显示系统实现了稳定可靠的实时通信。

1 系统总体设计

水下光通信系统整体结构如图 1 所示。系统由以太网模块、FPGA 发送模块、数据选择器模块、激光发射模块、LED 驱动模块、LED 阵列模块、光电接收模块、光电转换模块、信号放大处理电路、FPGA 接收模块、RS 编解码模块和上位机组成。

以太网模块接收上位机以太网数据包,并由 FPGA 进行数据的内部缓存,通过内部 RS 纠错编码器、8B10B 编码器进行编码,后经并串转换输出 LVTTTL 电平信号,由 FPGA 输出控制信号控制数据选择器将 TTL 电平信号调制到 LED 驱动电路或者激光二极管驱动电路中,(其中 LED 驱动模块由 Bias-T、恒流源电路和 LED 阵列构成)光源经过准直光学镜头发射进入水下信道。接收端光学系统包括滤光片、非球面接收镜头,接收光信号有 PMT 光电探测器和 APD 光电探测器两种方式选择,由 FPGA 控制选择接收光信号的探测器。将接收光信号进行光电转换后

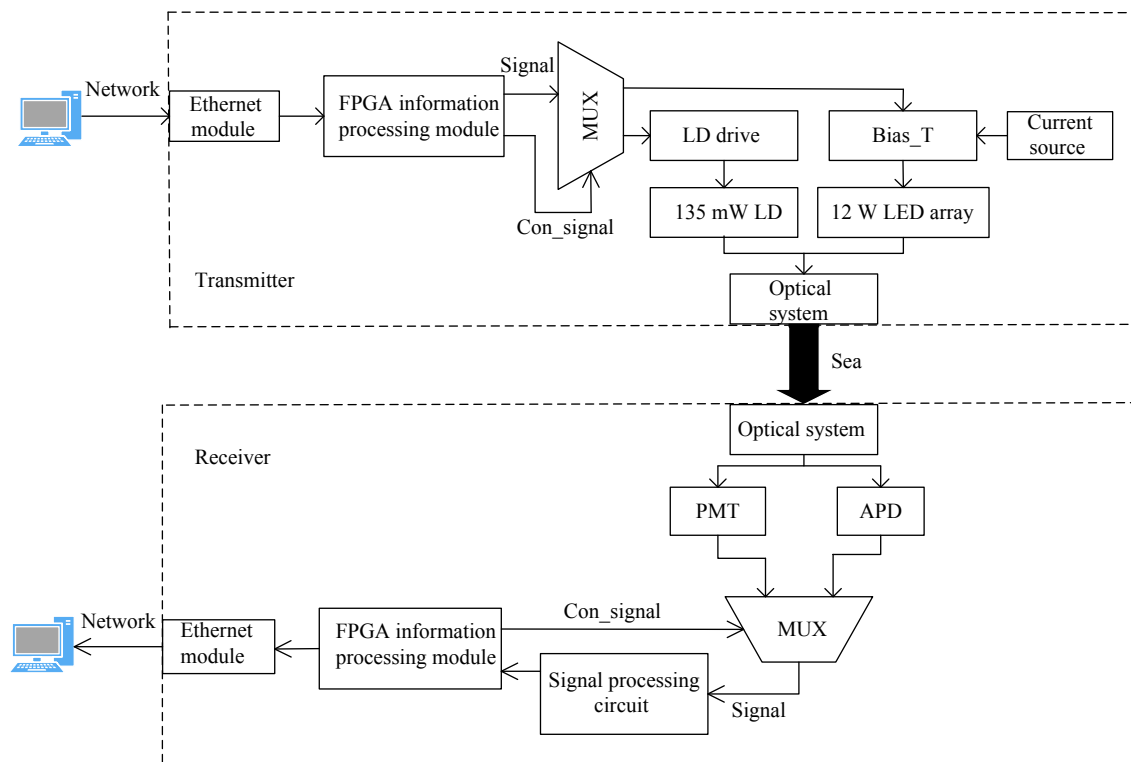


图 1 系统总体结构框图

Fig.1 Overall structure diagram of the system

送给信号放大处理电路,得到 LVTTTL 电平脉冲序列,再经 FPGA 接收模块解调和解码来恢复信息并经以太网模块送入上位机软件处理相关信息。

2 系统硬件设计

2.1 发射端光源硬件设计

系统根据水下光通信系统中光源切换由 FPGA 控制,其中激光 LD 调制技术已非常成熟,文中重点介绍优化后的大功率 LED 信号调制硬件设计。OOK 调制方式原理是利用传输信号的电平特性驱动 LED 光源开关,传统 OOK 调制电路对小功率光源驱动有良好的效果,大功率 LED 高速调制还存在很多难点。文中设计,利用大功率高速 NMOS 管承载高电压,大电流驱动 LED 光源,同时采用反馈控制电路能够准确设置驱动电流的数值,并对驱动电流进行实时监测与控制,使得 LED 光源能够输出恒定的平均光功率。优化后的大功率 LED 调制驱动电路电流-光功率曲线如图 2 所示。

通过反馈控制电路设置 LED 的阈值电流 $I_{BIAS} \approx I_{th}$,推动 LED 的工作范围处于临界导通状态,利用数字调制信号的电流,控制 LED 产生不同大小的光功

率变化。当调制信号发送数字信号“1”时,流经 LED 的电流为 $(I_{BIAS} + I_{MOD})$,对应的光功率为 $(P_{BIAS} + P_{MOD})$,当调制信号发送数字信号“0”时,流经 LED 的电流为 I_{BIAS} ,对应的平均光功率为 P_{BIAS} ,利用光电探测器探测不同信号的光功率,实现信号的传输。

根据上述原理可利用恒流源设置偏置电流,将偏置电流的值设置为 LED 的阈值电流,使 LED 发出阈值电流对应的光功率,然后通过信号电平驱动高速开关的导通与截止,对 LED 进行调制。高速开关在导通与截止的瞬间会产生一个非常窄的尖峰脉冲。由

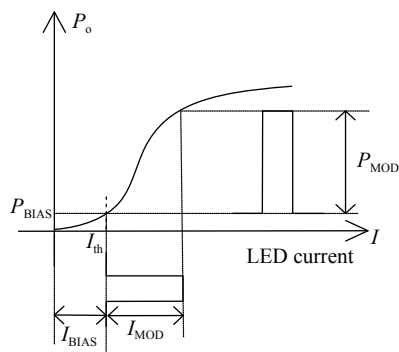


图 2 LED 数字调制特性曲线图

Fig.2 LED digital modulation characteristic curve

于尖峰脉冲非常窄,在低速率通信中影响小,在百兆以上的通信速率中影响较大,可应用磁珠元件设计电路降低尖峰坡度。

该方式实现了调制输出光功率与输入信号波形基本同步,电路模型如图 3 所示,可通过 MCU 设置流过 LED 电流大小。传统 OOK 模式采用电阻调控小电流,文中设计利用单片机实时采样调制端的电流值,根据采样电流值由单片机判决输出控制电压值的大小,最终形成对调制电流控制,实现对大功率 LED 信号调制。在水下光通信工程应用对大功率 LED 需求较多,可应用该方式对 LED 发射电路进行设计。

表 1 给出了传统 OOK 调制方式和优化后的

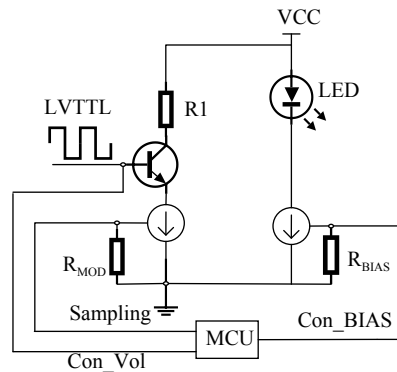


图 3 改进电路模型图

Fig.3 Improved circuit model diagram

OOK 调制方式性能参数对比,在平均发光功率上提高了 $P_{BIAS}/2$,而且其误时隙率更小。

表 1 传统 OOK 调制方式和改进 OOK 调制方式性能参数对比表

Tab.1 Comparison table of performance parameters between traditional OOK modulation mode and improved OOK modulation mode

Parameter	TRAD_OOK	IMP_OOK
Average optical power	$P_{MAX}/2$	$(P_{BIAS} + P_{MAX})/2$
Bandwidth requirements	R	R
Channel capacity	$1/\tau$	$1/\tau$
Slot error rate	$\frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{P_{MAX}/2\sigma^2}}{2} \right) \right\}$	$\frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{(P_{BIAS} + P_{MAX})/(2\sigma^2)}}{2} \right) \right\}$

图 4 给出了大功率 LED 信号调制电路硬件实物图,发射端光源 LED 采用 11 个欧司朗 LB H9GP 蓝光组成阵列和欧司朗 80 mW、450 nm 激光二极管 PL450B,串联成 LED 阵列,LED 阵列功率约为 33 W,驱动电压约为 40 V,电流约为 1 A。

选用调制端和偏置端 NMOS 管参数 I_D 约为 310 mA,在实验中将调制电流设置为 216 mA,偏置电

流设置为 143 mA,流过 LED 的电流约为 350 mA,如图 5 所示。在信号调制电路中,流过 LED 电流大小主要由调制器件 NMOS 管参数 I_D 决定,若在电路设计中选择 NMOS 管参数 $I_D > 1000$ mA,可使流过 LED 的电流达到 1000 mA 以上,实现对大功率 LED 的信号调制。

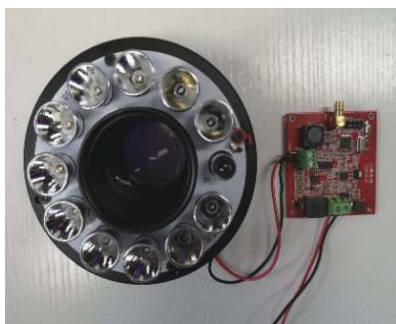


图 4 大功率 LED 信号调制电路实物图

Fig.4 Schematic diagram of high-power LED signal modulation circuit



图 5 测量流过 LED 电流值

Fig.5 Measured value of the current flow through the LED

测试显示设计的 LED 阵列通信带宽为 5 MHz, 图 6 给出了其带宽测试图。当系统光源采用 80 mW 激光管时设计的大功率 LED 驱动调制电路带宽可达 45 MHz。

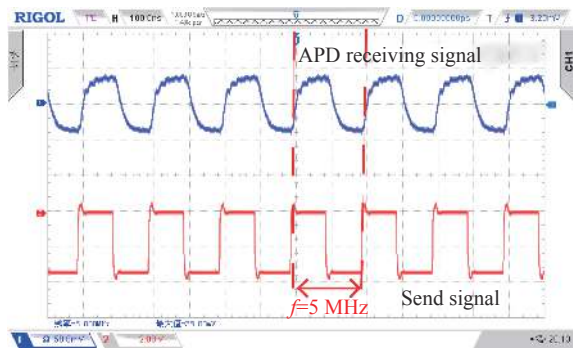


图 6 APD 接收通信带宽 5 MHz 波形图

Fig.6 5 MHz waveform of APD receiving communication bandwidth

2.2 系统接收端硬件设计

系统接收端设计了 APD 和 PMT 两种接收器, 接收示意图如图 7 所示。大面积 (探测光敏直径 5 mm) APD 接收系统具有较大的接收视场; 为系统提供了较大的动态范围, PMT 接收系统具有较高的接收灵敏度 (-60 dBm) 利于进一步扩展系统的通信距离。

APD 接收系统选用滨松 S8664-50K 雪崩光电二极管, 峰值灵敏度波长为 600 nm, 光谱响应范围 320~1000 nm, 截止频率为 60 MHz, 感光面积为 19.6 mm², 灵敏度 16A/W, 结合设计信号处理电路测试 APD 探测器灵敏度约为 -31.3 dBm。

PMT 接收系统选用滨松 H14447 光电倍增管, 峰值灵敏度波长为 450 nm, 光谱响应范围为 300~600 nm, 感光面积 156.25 mm², 灵敏度 670 A/W, 结合设计信号处理电路测试 PMT 灵敏度约为 -55.6 dBm。

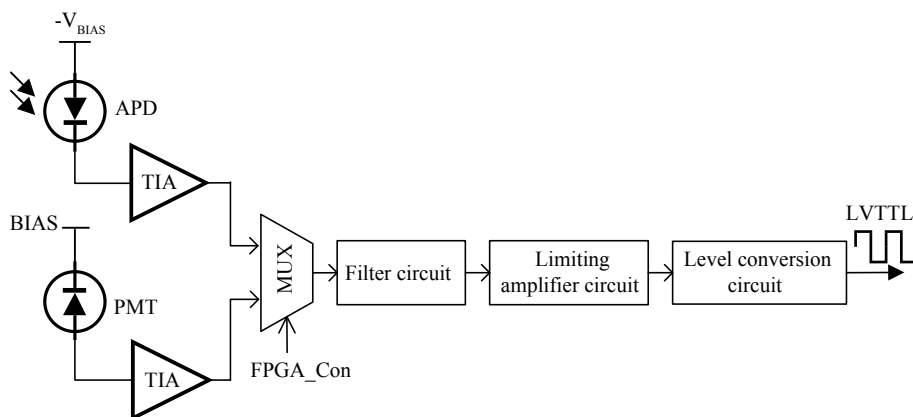


图 7 系统接收端示意图

Fig.7 Schematic diagram of the receiving end of the system

通过搭建测试平台分别对接收端 APD 及 PMT 接收系统进行测试, 图 8 和图 9 分别给出了两种接收

系统的 45 MHz 的测试波形。

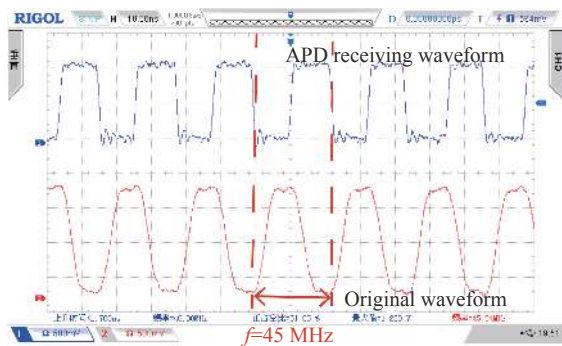


图 8 APD 探测器 45 MHz 测试输出信号

Fig.8 APD detector 45 MHz test output signal

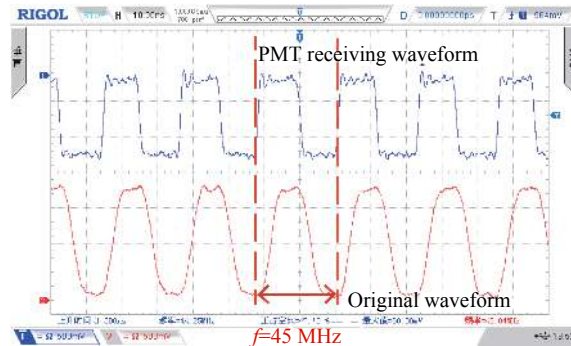


图 9 PMT 探测器 45 MHz 测试输出信号

Fig.9 PMT detector 45 MHz test output signal

3 系统水下实验及测试

3.1 水下信道模型分析

光信号在水下传输主要受到水的吸收特性和散射特性影响较大,同时与水下传输距离、收发角度等因素有密切关系,建立水下光通信链路模型如图 12 所示。

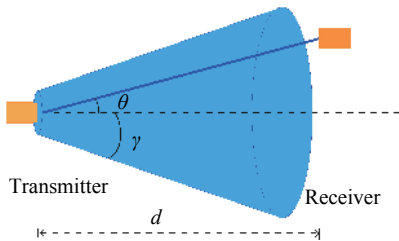


图 12 水下光通信链路模型

Fig.12 Underwater optical communication link model

设水下传输距离为 d , 光束发射半角为 γ , 收发链路与光束中心轴线偏轴角为 θ , 因此接收端接收光信号功率 P_R 可表示为^[11]:

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R \exp\left[-\varepsilon(\lambda) \frac{d}{\cos\theta}\right] \frac{S_R \cos\theta}{2\pi d^2 (1 - \cos\gamma)} \quad (1)$$

式中: P_T 为平均发射光功率; η_T 为发射端光学效率; η_R 为接收端光学效率; $\varepsilon(\lambda)$ 为水的吸收衰减系数与散射衰减系数之和; S_R 为接收端孔径面积。系统的误码率 P_E 可表示为^[12]:

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta P_R}{\sqrt{N_0}}\right) \quad (2)$$

式中: η 为光电转换系数; N_0 为接收电路的热噪声密度, 可表示为:

$$N_0 = \frac{4KTB}{R} \quad (3)$$

式中: K 为玻耳兹曼常数; T 为开氏温度; B 为接收机带宽; R 为接收机阻抗。根据水下光通信链路模型可有效计算出系统理论接收光功率, 分析误码率特性, 与实际测试结果相对比。

3.2 实验测试与分析

根据图 1 的结构设计完成了水下光通信样机, 并进行了长期的水密实验, 工程样机如图 13 所示。

实验环境为深 6 m、长 20 m、宽 8 m 的立方体水池, 注入极轻度浑浊的湖水来模拟大陆架的海水, 湖水衰减因子约为 0.24 dBm/m^[13], 通过光路设计完成通



图 13 工程样机

Fig.13 Engineering prototype

信距离的扩展, 后期将在武汉东湖开展更为实际的测试工作, 实验测试场景如图 14 所示。在水下光通信中, 一般蓝绿光在水中衰减度较小, 故设备分别采用中心波段为 470 nm 和 520 nm 的两种不同波段作为信号载体, 进行水下信息交互通信, 在水下测试距离约为 16 m, 通信速率为 18 Mbps, 图片信息传输完整。

由于设备在水下完全密封, 无法准确测量系统的接收光功率、误码率等参数。测试系统一些性能参数在大气中进行, 采用等效衰减方法, 主要采用空间远距离通信和不同程度的光学衰减片模拟水下系统测试, 如图 15 所示。

通过测试设备的发射光学系统损耗约为 -1 dBm,

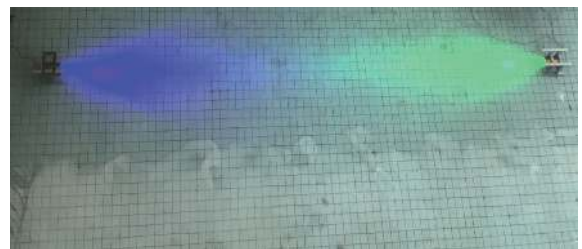


图 14 水下实验测试场景

Fig.14 Underwater experiment test scenario

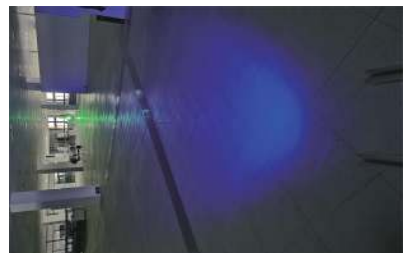


图 15 模拟水下测试实验

Fig.15 Simulating underwater test experiment

接收光学系统损耗约为-4.3 dBm, 根据参考文献 [13] 中提出大陆架的海水衰减约为 0.44 dBm/m, 对应衰减系数 $\epsilon(\lambda)$ 约为 0.12 m^{-1} , 水下设备无线光传输特性参数如表 2 所示。

根据上述参数可计算出水下理论接收光功率, 利

用衰减片将通信光功率衰减到接近值, 模拟水下通信距离, 在该通信距离下测试其通信速率与误码率之间的关系, 经过实验测试了在误码率小于 10^{-7} 情况下, 通信距离、通信速率、实际接收端光功率等参数如表 3 所示。

表 2 水下设备无线光传输特性参数

Tab.2 Wireless optical transmission characteristic parameters of underwater equipment

Parameter	Value
LED beam divergent half angle $\gamma/(\circ)$	3.04
LD beam divergent half angle $\gamma/(\circ)$	0.51
LED optical transmitting power P_T/dBm	35.6
LD optical transmitting power P_T/dBm	18
Transmission link off-axis angle $\theta/(\circ)$	0
APD receiving area of photodetector S_R/mm^2	19.6π
PMT receiving area of photodetector S_R/mm^2	156.25π
Optical wavelength λ/nm	470

表 3 设备性能参数测试

Tab.3 Equipment performance parameter test

Emission source	Communication distance/m	Communication rate/Mbps	Receiving detector	Theoretical received optical power value/dBm	Actual received optical power/dBm
LD	5	60	APD	-10.09	-11.3
LD	10	60	APD	-18.73	-18.5
LD	12	42	APD	-21.35	-20.9
LED	20	18	APD	-27.72	-28.2
LED	45	15	PMT	-38.77	-38.6
LED	60	10	PMT	-49.09	-53.2

同步测试了在不同距离下 LED 通信速率与误码率之间的关系, 实验采用 ET34A 误码测试仪采集通信误码率 (BER), 在设备中 FPGA 采用 8B/10B 编码, 因此测试中使用 2^7-1 码型, 该误码分析仪通信速率最高可到 34 Mbps。实验测试了通信距离分别为 20、45、60 m 的不同通信速率下误码率的大小, 曲线如图 16 所示。

系统编写了上位机软件, 外接高清摄像头对实时视频、图片及文字进行传输, 通信系统两端通过对以太网数据包数据进行分析通信系统可靠性。实验如图 17 所示, 在 1~60 m 的通信距离范围, 系统可实现了可靠的信息通信。以图片信息传输为例, 当通信距离为 10 m, 通讯速率可达 60 Mbps, 图 17 中红色曲线表示实时显示接收速率, 当前接收速率 60 Mbps, 实时视频、图片、文字等信息传输完整。当通信距离为

60 m, 实时视频及图像文件在误码率 10^{-7} 下, 通讯速率可达 10 Mbps。当通信距离大于 60 m 时, 水下信道链路衰减逐步增大, 系统误码率逐渐增大, 这对接收端探测器灵敏度提出了更高的要求。

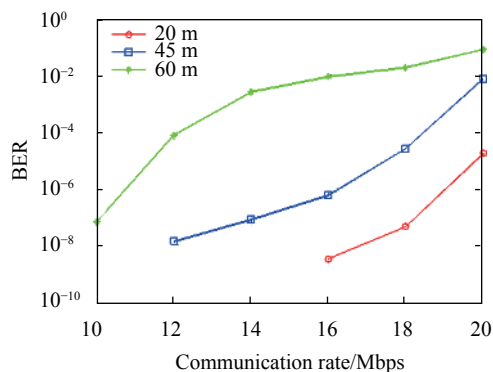


图 16 设备误码率性能测试

Fig.16 Bit error rate performance test of equipment



图 17 上位机显示收发数据图

Fig.17 Upper computer display transceiver data diagram

4 结 论

文中设计了一种面向海洋商用的水下实时双向链路通信系统,完成了工程样机的设计及水下测试。进行了模拟水下实验测试结果显示,在通信距离 1~60 m 范围内系统实现了可靠的双向信息交互;在通信距离 5 m、误码率 10^{-7} 时,通信速率可达 60 Mbps;在通信距离 60 m、误码率 10^{-7} 时,通信速率达 10 Mbps。该工程样机初步验证了基于可将光的水下高速双向链路通信的可行性,下一步系统将进一步优化发射端调制技术,提高接收端探测灵敏度,提高通信距离。

参考文献:

- [1] Cossu G, Corsini R, Khalid A M, et al. Experimental demonstration of high speed underwater visible light communications[C]//Optical Wireless Communications (IWOW), 2013 2nd International Workshop on. IEEE, 2013: 11-15.
- [2] Al-Rubaiai M, Tan X. Design and development of an LED-based optical communication system with active alignment control[C]//Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016: 160-165.
- [3] Wang P, Li C, Xu Z. 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.
- [4] Chi Nan, Zhao Yiheng, Shi Meng, et al. Gaussian kernel-aided deep neural network equalizer utilized in underwater PAM8 visible light communication system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26700-26712.
- [5] Chi Nan, Shi Meng. Advanced modulation formats for underwater visible light communications [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(12): 120603.
- [6] Wang F, Liu Y, Jiang F, et al. High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception [J]. *Optics Communications*, 2018, 425: 106-112.
- [7] Shi M, Zhang M, Wang F, et al. Equiprobable pre-coding PAM7 modulation for nonlinearity mitigation in underwater 2x1 MISO visible light communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(22): 5188-5195.
- [8] Chen Ming, Zou Peng, Zhang Long, et al. Demonstration of a 2.34 Gbit/s real-time single silicon-substrate blue LED-based underwater VLC system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(1): 7900211.
- [9] Leon P, Roland F, Brignone L, et al. A new underwater optical modem based on highly sensitive Silicon Photomultipliers[C]//Oceans. IEEE, 2017: 1-6.
- [10] Han Biao. Study on the bi-directional underwater wireless optical communication for deep sea application[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- [11] Arnon S, Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(3): 530-539.
- [12] Liu Weihao, Xu Zhengyuan, Yang liuqing. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 48-53.
- [13] Zhong Sencheng. Research on key technology of underwater laser imaging[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012. (in Chinese)