误差实时检测的水下 LED 光通信技术

叶德茂[1],刘 圆[1],王彦涛[1],王永进[2]

(1. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所 河南省水下智能装备重点实验室,河南 郑州 450015;
2. 南京邮电大学 Peter Grünberg 研究中心,江苏 南京 210003)

摘 要:为降低水下作业环境通信终端安装误差和机动目标指向误差的影响,给出了水下光通信系统架构,提出了一种基于气泡智能剔除的光斑识别定位算法,较好地解决了气泡对水下光通信链路稳定的影响,仿真结果显示该算法具有较好的鲁棒性。结合水下蓝绿光衰减较小的特点,设计了一种 6 个蓝光 450 nm 灯珠合束发射方案,提出了一种基于误差参量的链路模型;并在纯海水模拟信道环境下,通过仿真及等效实验表明:对于发射光强为平顶分布,偏轴误差在发散角 10°以内情况下,经过 50 m 信道衰减后,接收端接收功率>−20 dBm,眼图张开良好;反之,通信性能急剧下降。

关键词:水下光通信; LED; 水下链路模型; 误差检测; 眼图
中图分类号:TN929.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0918001

Underwater LED optical communication technology of real-time error detection

Ye Demao[1], Liu Yuan[1], Wang Yantao[1], Wang Yongjin[2]

(1. Henan Key Laboratory of Underwater Intelligent Equipment, the 713th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China;
2. Peter Grünberg Research Centre, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to reduce the influence of error coming from installation of communication terminals and pointing error of maneuvering targets in underwater working environment, the structure of underwater optical communication system was given. The light spot recognition and positioning algorithm based on intelligent bubble elimination was proposed. The effect of bubbles on link stability of underwater optical communication was well solved. The simulation results show that the algorithm has good robustness. Considering the characteristics of low attenuation in blue and green spectrum under water, an emission scheme of six lamps (central wavelength λ=450 nm) based on beam combination was designed, and a link model based on error parameters was proposed. In the simulation channel environmentof pure sea water, the experimental results show that the receiving power of the receiver was more than −20 dBm through 50 m channel attenuation when the distribution of transmitted light intensity was the flat-top and the divergence angle was less than 10°. Meanwhile, the eye diagram opened well. Otherwise, the performance dropped sharply.

Key words: underwater optical communication; LED; underwater link model; error detection; eye diagram

收稿日期:2019-04-05; **修订日期**:2019-05-03
基金项目:国家自然科学基金(61531166004)
作者简介:叶德茂(1982-),男,研究员,博士,主要从事水下光通信、图像处理及高精度跟瞄技术方面的研究。Email:laser713@sina.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

自由空间光通信 (Free Space Communication, FSO)由于其容量大、保密性好等特点,在近二十年得到了各国的高度重视争相开展研究工作; 我国在该领域起步晚, 但发展迅速, 特别是在哈尔滨工业大学、武汉大学、长春理工大学和中国科学院等一大批高校和科研院所的持续投入和研究,已在星-地、星-星以及舰-舰等大气光通信中得到了突破性进展;如哈尔滨工业大学马晶团队研发的“海洋二号”和武汉大学艾勇团队负责研发的“天宫二号”激光通信载荷为代表的星地光通信实验取得成功, 标志着我国在相关技术领域可与美、欧、日比肩[1-7]。然而,相比大气光通信而言,由于信道特性差异较大,我国在水下光通信领域与国外仍存在较大差距。目前,海洋领域的战略竞争越演越烈,已成为全球重要的安全关切。因此作为便捷、高速的水下无线光通信受到各国的高度重视, 国外很多研究机构先后进行了水下无线光通信的各种实验。2010 年美国伍兹霍尔研究所水下实验室在海洋科学会议上公布了其团队开发的基于 LED 的水下无线光通信系统,可以在 100 m 范围内达到 10~20 Mb/s 的传输速率。2011 年,美国耶鲁大学水下无线光通信系统 AquaOptical II 实现传输速率为 2.28 Mb/s,通信距离为 50 m[8]。2017 年,美国商业化产品 LightSpeed U10 水下光通信系统, 可以实现 100 m 距离的水下全双工视频通信[9];此外,意大利比萨大学的原型设备实现传输速率为 10 Mbps,通信距离达 7.5 m。我国目前研究进展相对缓慢,更多的研究还只是处于仿真模拟和实验室的水箱 (水槽)实验验证阶段。2011 年,浙江大学实现了传输距离为 9 m, 速率约为 115 kbps 的水下光通信数据传输,并于 2016 年使用 16QAM 编码以及 OFDM 调制方式, 使用蓝光 LED 实现在 2 m 水下高达百 Mbps 的数据传输速率[10]。2014 年,南京邮电大学李丽在实验室水箱中模拟海水环境, 通过实验分析了可见光视频通信系统的传输效果, 并通过仿真分析了接收端信噪比与传输距离的关系, 得出了基于 1.1 W 蓝光 LED 的系统传输距离的理论最大值[11]。然而,在实际水下作业环境中, 通信双方终端安装误差或其本体需要机动造成的跟瞄误差, 如 UUV-无人潜航器,将可能造成水下链路无法建立。目前,基于误差实时检测及补偿的水下光通信技术还鲜有报道,因此亟需开展相关技术研究。

1 系统组成和功能

水下 LED 无线光通信系统主要包括通信主板、光学收发天线、电源模块、误差检测模块、云台及控制单元和辅助声学粗定位模块。考虑水下作业复杂,首先采用辅助声学粗定位模块实现对信宿和信源的快速定位,给出对方大致的方位,并发射使能信号驱动 LED; 根据声信号给出的大致方位调转云台至指定位置。信源通过编解码模块完成信道编解码工作,而后通过调制解调模块, 传送至 LED 调制驱动电路,将信源信号加载到高频响的 LED 灯上,信号以光束形式经发射光学镜头发送出去。在接收端,光束经接收天线汇聚后,照射到光电探测器上,由此光信号转换为电信号,信号经功率放大、低通滤波后发送至调制解调模块,完成解调;而后通过编解码模块完成解码,并通过后均衡等处理后,输出到终端。一路照射在误差检测模块 CCD 靶面上,当接收到信号光后,通过图像处理完成高低、方位偏轴角(θ_x,θ_y)的解析。解析后发送至云台及其控制单元进行光轴的精确对准。与大气激光通信不同,由于水下信道特性及实际工况要求光学发散角不宜太小, 因此光轴对准精度不必达到角秒量级。考虑水下环境下误差检测和基于误差链路模型是区别于大气光通信的一个关键,文中进行重点阐述。

2 误差检测模块

2.1 硬件组成

系统主要由高清网络摄像机、以太网接口模块、XILINX 的 FPGA、NVIDEA 的 Jetson TX2 GPU 和云台及其控制单元等组成,如图 1 所示。

该架构采用 Jetson TX2 系列 GPU,内嵌 256 个 CUDA 核,换算成运算能力大于 1.0 TFLOPS。GPU 与 FPGA 的互联方式采用标准的 PCI-Express 总线,总线拓扑为 4 Lane,5.0 Gbps/Lane。光学收发天线主要由光学镜头和中心波长 450 nm、半高宽 20 nm 的光学窄带滤波片组成。采用高清网络摄像机,其有效像素为 1 920(H)×1 080(V)、单位为 pixel,选用 Sony 1/

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.8 英寸芯片；当其对信号光进行采样后，通过以太网转换模块高速下传至 FPGA 缓存内，FPGA 采用 XILINX XC7K325T3FFG900I 芯片，考虑高速信号时钟可能不同步的问题，在该款 FPGA 接口控制电路上，通过采用基于 FIFO 的动态相位校正确保时钟高度同步，将采集到的视频图像发送至 GPU。GPU 接收到图像后通过误差检测算法后解析出偏轴角(θ_x，θ_y)并回传至 FPGA，最后采用 RS422 将需要补偿的误差量(θ_x，θ_y)发送给云台及其控制单元，从而完成误差的实时检测和动态补偿[12]。

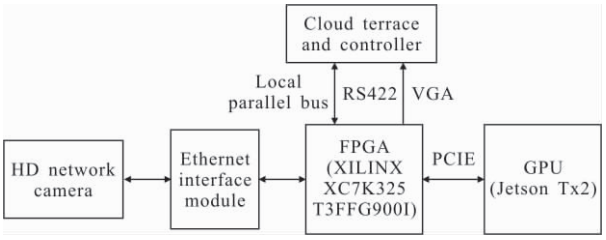

图 1 误差检测硬件架构

Fig.1 Hardware architecture of error detection

2.2 误差检测算法

较大气光通信，水下接收到的光斑图像除了容易受絮流影响外，还受水泡影响。在复杂水域内可能存在被大的水泡带走造成链路中断的情况，如图 2 所示；为确保水下通信链路的可靠工作，有必要对水泡进行准确快速识别定位。

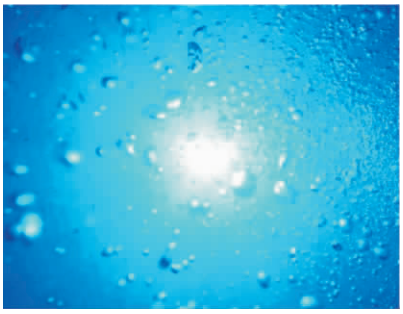

图 2 受水下气泡影响下的接收光斑图像

Fig.2 Image of received facula under the influence of underwater bubble

首先对摄像机采集的图像进行预处理，将 RGB 彩色图像变换成 8 位灰度图像，灰度图像 $f(i,j)$ 可表示为：

$$f(i,j)=p\cdot R(i,j)+q\cdot G(i,j)+t\cdot B(i,j) \tag{1}$$

式中：$p=0.299$，$q=0.587$，$t=0.114$，$0\leqslant i\leqslant 1\,080$，$0\leqslant j\leqslant 1\,920$，$i$，$j$ 为当前帧图像对应的行和列；$f(i,j)$表示其像素坐标(i,j)对应的灰度值(0~255)。考虑有噪声和背景的影响，$f(i,j)$可表示为：

$$f(i,j)=f_T(i,j)+f_N(i,j)+f_B(i,j) \tag{2}$$

式中：$f_T(i,j)$为目标点灰度值；$f_N(i,j)$为噪声灰度值；$f_B(i,j)$为背景图像灰度值。在 CCD 图像中，噪声和弱小目标同为高频分量，背景为低频分量。

$$Z_p=\max(f(x,y)) \tag{3}$$

则阈值 $Z_0=\alpha(Z_p-Z_b)+Z_b$；文中采用高斯束腰位置进行阈值分割，$\alpha=1/e^2$；

$$u(x,y)=\begin{cases}1;\ \text{if } f(x,y)\geqslant Z_0\\ 0;\ \text{if } f(x,y)<Z_0\end{cases} \tag{4}$$

阈值分割后，为提高目标信噪比 SNR，采用中值滤波进行滤波降噪处理，结合实际外场图像特征，其二维模板按 3×3 区域选取。通过积分图中图像平均灰度动态调整增益系数 g，g 按 [−3 −2 −1 0 1 2 3] 进行选取。考虑一般水下气泡属于连通区域，采用一种八连通区域识别定位算法，即像素 1~8 中相邻的点构成连通区域，如图 3 所示。

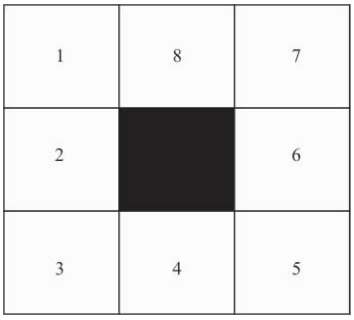

图 3 八位连通区域示意图

Fig.3 Schematic diagram of eight connected region

在实际工况中，光斑图像往往较大，同时出现 2 个与光斑面积相当的气泡概率较低。因此，完成连通区域识别后，选择面积前两位的区域 G_1，G_2 作为备选，且对应面积为 $G_1>G_2$；标出其所在矩形区域左上角像素坐标(x,y)，$x=\{x_1,x_2\}$、$y=\{y_1,y_2\}$。

为进一步确定气泡，结合基于先验的模板匹配算法，具体步骤实施如下：

(1) 如图 4 所示，已知高清图像大小为 1 920×1 080，根据实际经验和先验数据构建模板，模板尺寸为 $M\times N$[13]。

(2) 分别计算 G_1，G_2 的归一化相关系数如下：

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$R_{xxy}=\frac{\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}(f(i+x,j+y)-T(i,j))^2}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}T(i,j)^2}\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}f(i+x,j+y)^2}} \tag{5}$$

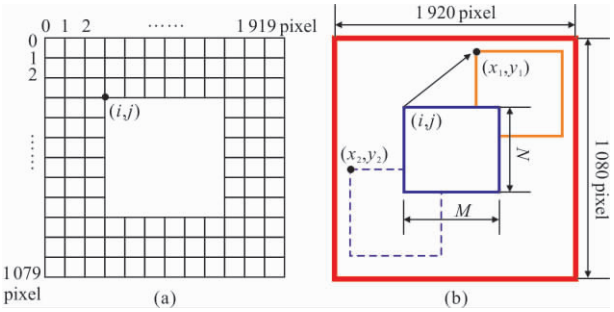

图 4 高清灰度图模板匹配原理图

Fig.4 Schematic diagram of template matching of high resolution gray image

经过匹配运算后，求得两个相关系数 R_1 和 R_2。根据 R_1 和 R_2 与阈值 Th 比较，输出光斑坐标(X,Y)可表述如下：

$$(X,Y)=\begin{cases}X=x_1+\frac{M}{2},Y=y_1+\frac{N}{2};R_1\leqslant \mathrm{Th},R_2\leqslant \mathrm{Th},R_2\geqslant \mathrm{Th}\\ X=x_2+\frac{M}{2},Y=y_2+\frac{N}{2};R_1\geqslant \mathrm{Th},R_2\leqslant \mathrm{Th}\end{cases} \tag{6}$$

输出最终的光斑偏轴角信息(θ_x,θ_y)可表述如下：

$$(\theta_x,\theta_y)=\begin{cases}\theta_x=X\cdot\frac{\rho}{f}\\ \theta_y=Y\cdot\frac{\rho}{f}\end{cases} \tag{7}$$

式中：ρ 为像元尺寸；f 为光学天线焦距。当 $R_1\geqslant$Th 时，认为系统已被气泡带走，转入步骤(3)。

(3) 进入记忆模式

利用保存的最近 6 帧历史模板信息采用帧差法对当前帧进行检测，将历史模板与预处理后的图像进行模板匹配，验证匹配有效性。匹配有效退出记忆跟踪，进入正常跟踪状态；若无效，则取出下一个缓存的历史模板重新进行匹配；若所有历史模板均匹配无效，则根据声学辅助定位模块启动重捕模式。

3 基于误差参量的链路模型

通常情况在不同水域条件下光的衰减系数(10 倍衰减长度)不同，如表 1 所示[14]。

表 1 不同水域光传输衰减系数

Tab.1 Attenuation coefficient of optical transmission in different water areas

Tap water	Pure seawater	High seas	Continental shelf	Beach	Port
0.15	0.02–0.03	0.04–0.07	0.09–0.12	0.14–0.18	0.37–0.43

受到海水中物质的吸收和散射影响，光传输衰减系数为吸收衰减与散射衰减之和，可表述为：

$$c(\lambda)=a(\lambda)+b(\lambda) \tag{8}$$

光学传输衰减因子是波长和距离的函数，其关系可表述如下[12]：

$$L_{\mathrm{pr}}(\lambda,d)=\exp(-c(\lambda)d) \tag{9}$$

随着光束在水中传播，受到海水吸收和散射的影响，光束将向周围发散，光强减弱。设水下发送端光源中心光强为 I_0，对于波长为 λ 的光束，可以用比尔定律来描述，其光强随着距离的增加服从指数分布衰减可表述为：

$$I(d)=I_0\exp(-c(\lambda)\cdot d) \tag{10}$$

式中：I_0 单位为 cd；$c(\lambda)$为海水对光的衰减总系数；d为光传输距离。

由第 k 个 LED 灯珠发射的中心光强可由其光通量计算得出：

$$I_k=(1-\ln 2/\ln(\cos(u)))\frac{\phi(k)}{2\pi} \tag{11}$$

式中：$\phi(k)$为第 k 个 LED 灯珠亮度；u 为 LED 灯珠发射半角。已知发光效率 $K(\lambda)$可表示为：

$$K(\lambda)=\frac{C\int_a^b E(\lambda)V(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_a^b E(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \tag{12}$$

式中：变量 a、b 分别表示光谱分布的上下限，单位 nm；考虑选用中心波长 450 nm 单色性较好的 LED，即 $a\approx b$；则第 k 个 LED 灯珠光通量 $\phi(k)$可表述如下：

$$\phi(k)\approx P(k)\cdot K(\lambda) \tag{13}$$

式中：$P(k)$是第 k 个灯珠的发光功率，结合公式(11)，发射总功率 P_t 关于 I_k 的函数如下：

$$P_t=\sum_{k=1}^{n}\frac{2\pi I_k}{K(\lambda)(1-\ln 2/\ln(\cos(u)))} \tag{14}$$

式中：n 为 LED 实际工作灯珠的个数，结合现阶段蓝光 LED 发光水平，文中采用 6 个 LED 灯珠等边排布方案，文中 n=6。

在实际水下作业过程中，由于存在安装误差和跟瞄对准误差，假定误差为 $\Delta\theta$，水下信道光链路如图 5 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

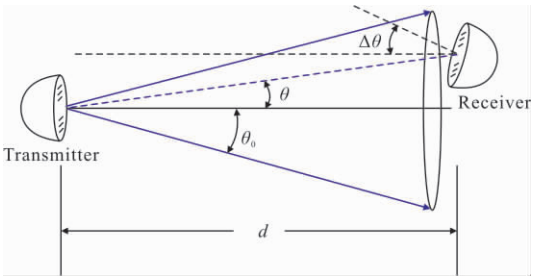

图 5 水下信道光链路二维几何模型

Fig.5 2D geometric model of underwater optical link

在存在误差 $\Delta\theta$ 情况下，结合公式(14)，通过水下信道衰减后接收光功率 P_r 可描述为：

$$P_r=\eta\cdot\eta_t\cdot\eta_r\cdot\exp\left(-c(\lambda)\cdot\frac{d}{\cos\theta}\right)\frac{A_r\cos(\theta+\Delta\theta)}{\pi(d\cdot tg\theta_0)^2}\cdot P_t \quad (15)$$

式中：η_t 为发射端光学系统效率；λ 为 LED 光谱中心波长；η_r 为接收光学系统效率；θ 为接收端与发射端光轴中心偏轴角；$\Delta\theta$ 为接收端光轴与发射端偏轴；d 为链路距离；g 为接收端光学增益、A_r 为接收面积。η 为海水信道的水流、气泡等随机性影响造成的信道传输效率，对于水流和气泡影响较小时 η 取 1。

具体在光学天线设计上，单个 LED 优化前加一个非球透镜，做角度控制。非球透镜的挑选原则是数值孔径 NA 尽量大。采用浙大三色(SENSING)反光镜式分布光度计测量出单 LED 的光强分布如图 6 所示。

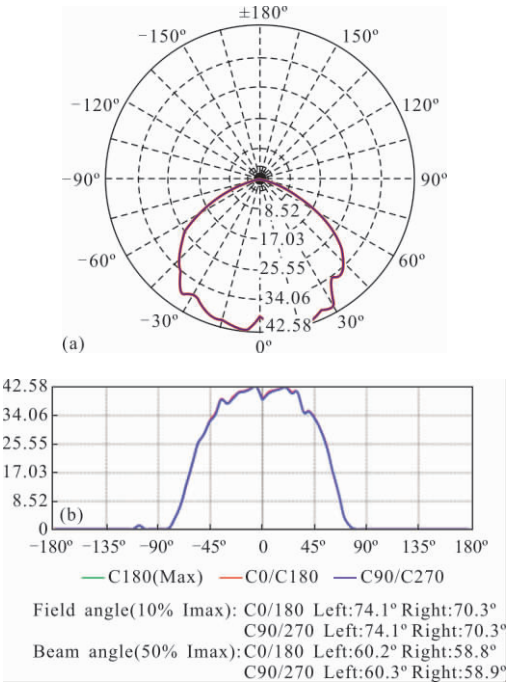

图 6 单 LED 光强分布模型

Fig.6 Single LED intensity distribution model

采用非序列光学设计将 6 个单 LED 光源相对旋转 60°，采用 ZEMAX 程序进行光线追迹仿真结果如图 7 所示。

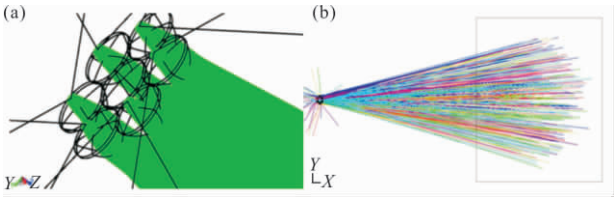

图 7 光线追迹仿真结果

Fig.7 Results of ray tracing simulation

输出光强平顶分布仿真结果如图8 所示。

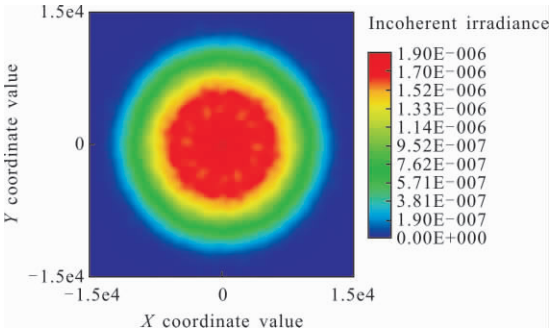

图 8 光学发射光强呈平顶分布

Fig.8 Flat top distribution of optical emission intensity

4 仿真及实验分析

考虑现阶段主要验证关键技术为主，因此分别开展了相关实验。对图 2 中的水下典型气泡影响下光斑图像进行分析，再进行仿真验证。图 9(a)对可能存在的气泡和光斑进行识别，并用红色矩形边框标注，除个别气泡由于特征与海水环境较为接近无法正常识别外，均能得到精确标注，表明文中算法具有较强的识别能力和鲁棒性。针对图像的识别结果，采用文中算法对光斑进行精确定位，如图 9(b)所示。整

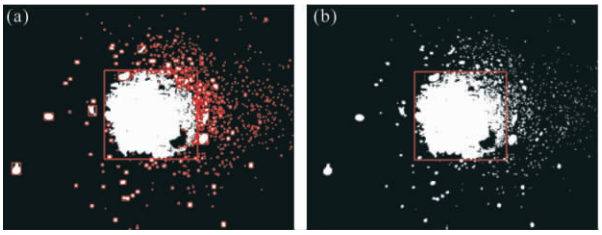

图 9 连通区域(含光斑和气泡)识别结果(a)及最终光斑识别定位(b)

Fig.9 Identification results of connected regions (including facula and bubble) (a) and final facula recognition (b)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

个光斑图像处理过程延迟不大于 20 ms，定位精度 RMS 不大于 2 pixel。考虑水下光通信距离较短，一般不大于 100 m，因此未来水下机动平台间光通信主要以粗跟踪为主，因此脱靶量数据刷新率和定位精度能较好地满足未来实时性要求。

以纯海水为例，由公式(15)可知，假定水流和气泡影响较小，LED 发散角半角为±10°，中心波长为 450 nm，仿真参数设置如表 2 所示。仿真结果如图 10 所示，在纯海水环境下，经过 50 m 的模拟信道衰减后，接收端接收功率为−18.63 dBm(大于−20 dBm)，表明系统具备满足水下通信距离 50 m 的能力。

表 2 仿真参数设置表

Tab.2 Setting table of simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength/nm	450
$c(\lambda)$ pure seawater/m^{-1}	0.02
Transmitting efficiency η_t	0.9
Received efficiency η_r	0.6
Channel efficiency η	1
Received area A_r/m^2	0.012 67
Emission intensity of lamp bead/cd	22
Half-angle of lamp bead emission/(°)	65
Installation error $\Delta\theta$/(°)	0
APD area/cm^2	1
Beam divergence angle/(°)	10

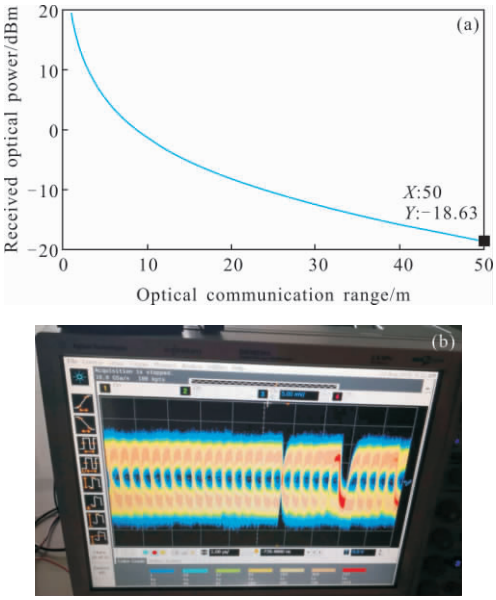

图 10 接收功率随距离的衰减曲线及在−18.63 dBm 眼图

Fig.10 Attenuation curve of received power with distance and eye diagram@−18.63 dBm

建立基于误差检测补偿的通信系统验证环境，采用 KEYSIGHT 336000A 系列函数/任意波形发生器产生 1Mbps 的伪随机二进制序列码型 PRBS PN7。接收终端采用 Key sight DSO9254A 进行眼图检测，当接收端在发散角内，眼图张开良好，如图 11(a)所示；对于发散角 θ 平顶分布的发射光束，当偏轴误差大于发散角时，眼图性能急剧下降；当发散角增大到 1.3θ 时，眼图睁开较小，此时接收到的信号强度较弱，通信性能较差，如图 11(b)所示；当进行误差补偿后，眼图迅速恢复良好。

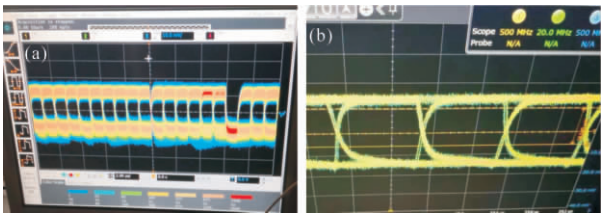

图 11 误差补偿前后眼图变化

Fig.11 Eye diagram changes of error compensation

考虑本系统设计通信速率不大于 10 Mb/s，眼图可参考国标 GB/T 20185-2006《同步数字体系设备和系统的光接口技术要求》关于低速 STM-1 眼图模板的具体要求，如图 12 所示。

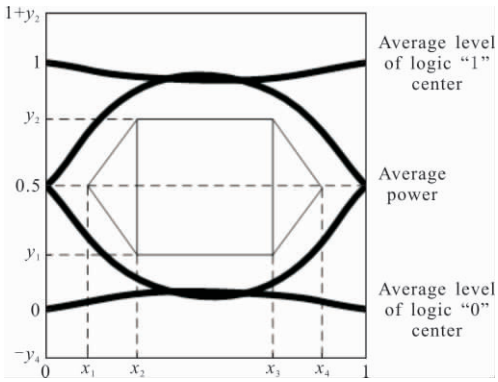

图 12 眼图模板

Fig.12 Eye diagram template

已知 STM-1 眼图模板参数，x_1/x_2、x_2/x_3、y_1/y_2 和 y_3/y_4 分别为 0.15/0.85、0.35/0.65、0.20/0.80 和 0.20/0.20，结合图 11 可以看出，横轴上升，下降沿基本上控制在 25%以内，纵轴噪声容限控制在 20%以内，信号质量均可满足标准要求。依据上述标准对测试得到的眼图进行测量，可以判断信号质量较好。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 结 论

针对实际水下作业需要机动或安装误差存在的问题，给出了一种基于误差实时补偿的移动平台间水下光通信系统框架，并提出一种基于 GPU 的气泡智能剔除光斑识别定位算法，较好地降低水下气泡对通信链路的影响，整个算法处理过程延迟较小，定位精度较高，能较好地满足实际工程需要。结合蓝绿光为“水下窗口”波段，设计了一种 6×22 cd 蓝光 450 nm灯珠合束发射方案并构建了基于误差参量的链路模型，采用仿真及等效实验法验证误差补偿的必要性和链路的有效性。文中的工作为后续在海洋环境下移动平台间自动跟瞄下水下光通信系统研制提供一定的理论指导和技术支撑。

参考文献：

[1] Wang Yi, Wang Yunmin, Ma Jing. Influence of angle-of-arrival fluctuations on ground-to-satellite laser uplink communication system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(1): 0122001.

[2] Ma Jing, Fu Yulong, Yu Siyuan, et al. Further analysis of scintillation index for a laser beam propagating through moderate-to-strong non-Kolmogorov turbulence based on generalized effective atmospheric spectral model [J]. ***Chin Phys B***, 2018, 27(3): 034201.

[3] Wang Yi, Yang Shuai, Ma Jing, et al. Performance analysis of coherent OFDM system in free space optical communication [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(7): 0722003.

[4] Liang Hexi, Dai Yonghong, Ai Yong, et al. Influence of local oscillator power on sensitivity of coherent detection of space balance detector[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25(2): 335-341. (in Chinese)

[5] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication[J]. ***Chinese Optics***, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)

[6] Guan Shu, Wang Chao, Tong Shoufeng, et al. Optical antenna design of off-axis two-mirror reflective telescope with freeform surface for space laser communication [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46 (12): 1222003. (in Chinese)

[7] Wang Huiqin, Hu Qiu, Huang Rui, et al. DC offset elimination in wireless optical channel estimation by employing implicit sequence [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25(10): 2760-2766. (in Chinese)

[8] M Donic, D Rus. Bidirectional optical communication with AquaOptical Ⅱ [C]//IEEE International Conference on Communication Systems, 2011: 390-394.

[9] Ocean Link Light Speed TM U10 [DB/OL].http://tplogic.com/lightspeed/U10.

[10] Yang Lei. The research on the underwater contactless information transmission technology for deep seafloor observatory network [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)

[11] Li Li. Underwater portable video communication system based on blue light LED[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)

[12] Ye Demao, Wang Jing, Li Peizheng, et al. A novel algorithm for maneuvering target detection under the high energy laser irradiating[C]//SPIE, 2017, 10462: 104624E.

[13] Ye Demao, Li Sichao, Yan Zhihui, et al. A new method for incoherent combining of far-field laser beams based on multiple faculae recognition[C]//SPIE, 2017, 10710: 1071034.

[14] Zhong Sencheng. Research on key technology of underwater laser imaging[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012. (in Chinese)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net