

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250133.

专题:海洋通信与传感网络

王佳乐,郑凯文,廉杰. 水下无线光通信与测距一体化系统设计与实现[J]. 光通信研究, 2025(4): 250133.

Wang J L, Zhen K W, Lian J. Design and Implementation of an Integrated Underwater Wireless Optical Communication and Ranging System [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250133.

水下无线光通信与测距一体化系统设计与实现(特邀)

王佳乐,郑凯文,廉杰

(西北工业大学航海学院,西安 710072)

摘要:【目的】随着海洋经济的迅速发展,水下物联网(IoT)面临着智能化和便捷化的迫切需求。传统通信与感知模块的分离导致设备体积庞大和成本高昂,制约了整体系统性能,从而促使通信与感知一体化(ISAC)系统,尤其是基于水下无线光通信(UWOC)的光学ISAC(OISAC)系统成为了当前研究热点。尽管OISAC系统具有高频谱利用率和低延迟的优势,但在实际应用中仍面临时钟同步及硬件实现的挑战。【方法】针对这些问题,文章提出了一种基于扩频信号的一体化双工水下光通信测距(OICAR)系统。文章采用扩频通信体制传输通信信息,这种通信方式能够有效对抗发射光源和传输信道导致的信道衰落,保证了通信信息成功传输。同时,文章在双工扩频信号码片中添加时间戳信息,利用主从机时间戳信息、扩频码自相关特性以及频率控制字(FCW),实现了异步收发机水下高精度测距。并且文章采用发光二极管(LED)阵列和现场可编程门阵列(FPGA)处理系统搭建了实时硬件实现系统,为水下OICAR系统的发展提供了硬件验证系统。【结果】随后,在拖曳水池对OICAR实时系统进行了通信与测距实验,验证了文章设计系统水下最远通信距离可达63.5 m,且测距精度保持在 ± 0.25 m以内。【结论】这一结果表明,文章所设计OICAR系统能够实时实现高效的水下通信与精确测距功能。

关键词:水下无线光通信;硬件设计;水池实验;一体化光通信测距;扩频系统

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Design and Implementation of an Integrated Underwater Wireless Optical Communication and Ranging System

WANG Jiale, ZHENG Kaiwen, LIAN Jie

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: 【Objective】 With the rapid development of the marine economy, the underwater Internet of Things (IoT) is facing urgent demands for intelligence and convenience. The separation of traditional communication and sensing modules has led to large device sizes and high costs, which restrict the overall system performance. This has spurred the development of Integrated Sensing and Communication (ISAC) systems, especially Optical ISAC (OISAC) systems based on Underwater Wireless Optical Communication (UWOC), which have become a current research hotspot. Although OISAC systems offer the advantages of high spectral efficiency and low latency, they still face challenges in clock synchronization and hardware implementation in practical applications. 【Methods】 To address these issues, the paper proposes an Optical Integrated Communication and Ranging (OICAR) system based on spread-spectrum signals. The paper employs a spread-spectrum communication scheme to transmit communication information, which effectively combats channel fading caused by the transmitter light source and the transmission channel, thereby ensuring the successful transmission of communication information. Additionally, the paper incorporates time-stamp information into the chips of the duplex spread-spectrum signals. By utilizing the timestamp information of the master and slave transceivers, the autocorrelation properties of the spread-spectrum code, and the Frequency Control Word (FCW), the system achieves high-precision underwater ranging with asynchronous transceivers. Furthermore, the paper constructs a real-time hardware implementation system using Light Emitting Diode (LED) arrays and a Field Programmable Gate Array (FPGA) processing system, providing a hardware verification platform for the development of the underwater OICAR system. 【Results】 Communication and ranging experiments are conducted on the OICAR real-time system in a towing tank. Results demonstrate that the designed system achieves a maximum underwater communication distance of 63.5 m while maintaining ranging accuracy within ± 0.25 m. 【Conclusion】 These findings indicate that the proposed OICAR system can realize efficient underwater communication and precise ranging functions in real time.

Key words: UWOC; hardware design; water-tank experiment; OICAR; spread spectrum system

0 引言

随着海洋经济的迅速发展,建立水下物联网已

经成为国民经济发展的重要方向^[1]。因此,我们对水下无线光通信(Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)^[2-4]和水下无线光探测技

收稿日期:2025-04-07; 修回日期:2025-04-24; 纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62001392)

作者简介:王佳乐(1997-),男,陕西宝鸡人。博士,主要研究方向为通信信号处理。

通信作者:廉杰,副教授。E-mail:jlilian@nwpu.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

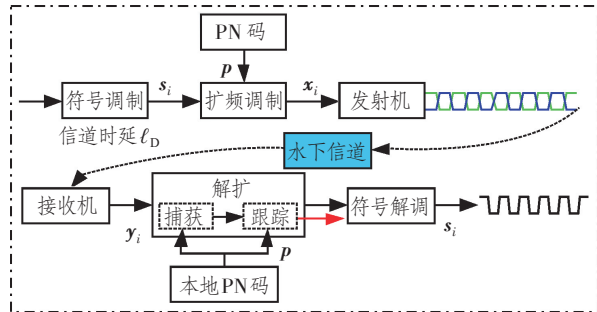
术^[5-8]的需求日益强烈。这两种技术能够提高水中短程高速无线通信和高精度探测的能力。然而,现有研究和装备通常将通信与测距功能作为两个单独的模块进行设计与安装。这种方式增加了系统的成本、设备重量以及所占用的空间,同时导致了通信和测距系统间的光谱竞争问题。为了解决这些问题,通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)系统逐渐受到了研究人员的关注^[9-11]。这一技术在射频和水声通信领域都得到了充分的研究,然而在水下光通信领域中的研究相对较少。对于水下光通信感知一体化(Optical Integrated Sensing and Communication, OISAC)系统而言,实际系统的实现面临的挑战是多种多样的,如双工平台的非同步性。这些问题导致现有理论工作很难在复杂的水下环境中实现。

针对这些问题,本文提出了一种基于扩频信号的一体化双工水下光通信测距(Optical Integrated Communication and Ranging, OICAR)系统。采用扩频通信体制传输通信信息,同时在双工扩频信号码片中添加时间戳信息,利用主从机时间戳信息、扩频码自相关特性以及频率控制字(Frequency Control Word, FCW)实现异步收发机水下高精度测距。随后,在拖曳水池对 OICAR 实时系统进行了通信与测距实验,验证了 OICAR 系统在实际水下环境中的通信稳定性和测距精度。

1 系统模型

1.1 发射信号模型

本文所提 OICAR 系统采用直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)方式进行实时通信和距离测量,系统框架如图 1 所示。



注:PN码为伪随机码;\$s_i\$为OOK调制后的信号;\$p\$为扩频码;\$x_i\$为扩频后信号;\$y_i\$为光通信接收机接收信号。

图 1 使用 DSSS 方式的 OICAR 系统框架

Figure 1 The proposed OICAR system using DSSS technique

在 OICAR 系统中,由于发光二极管(Light

Emitting Diode, LED)阵列只能发送实值信号,通常采用强度调制(Intensity Modulation, IM)与直接检测(Direct Detection, DD)的通信方案。其中,IM通过调节LED的光照强度来调制符号,而DD则在接收端直接对光信号的幅值进行解调。在UWOC的开关键控(On-Off Keying, OOK)调制方案中,LED阵列打开表示发送数字符号“1”,关闭表示发送数字符号“0”。本文采用非归零OOK(Non-Return-to-Zero OOK, NRZ-OOK)对信息符号进行调制。因此,调制后的信号 s_i 可表示为

$$s_i = a_i v, \quad (1)$$

式中: a_i 为需要被调制的信息比特,取值为1或0, i 代表第 i 个发射的OOK符号; v 为长度为 L 的向量,表示持续时间为 T_{symbol} 的矩形脉冲采样序列。

在扩频系统中,采用PN码将调制后信号 s_i 进行扩频后发送,本文选用 m 序列作为OICAR系统的PN码。一个码周期的PN码 p 可表示为

$$p = (p[1], p[2], \dots, p[L])^T, \quad (2)$$

式中, $p[l]$ 为在一个码周期内的PN码的第 l 个采样值。

随后,扩频系统使用1个码周期的PN码 p 对发射符号进行扩频,得到的发射信号 x_i 为

$$x_i = s_i \otimes p, \quad (3)$$

式中, \otimes 表示二进制异或。向量 x_i 的长度为 L , $x_i = (x_i[1], x_i[2], \dots, x_i[L])^T$,式中, $x_i[l]$ 为在一个码周期内,第 i 个离散信号 s_i 被PN码扩频调制后的第 l 个扩频信号采样值。

1.2 通信接收机信号模型

对于通信接收端而言,接收到的电信号 y_i 可表示为

$$y_i = h * x_i + w_i, \quad (4)$$

式中: $*$ 为时域卷积符;向量 w_i 为加性噪声; h 为信号 x_i 经过的信道。由于基于扩频通信体制的OICAR系统通常能通过扩频的方法有效对抗信道频率选择性衰落,因此本文只考虑直达信道延迟和大尺度衰落,这一传输信道可简化为

$$h[n] = g\delta[n - \ell_D], \quad (5)$$

式中: n 为离散时刻值; g 为从发射机到接收机的信道损耗; ℓ_D 为接收信号与本地PN码匹配的码偏移的具体数值,即信道延迟; $\delta[n - \ell_D]$ 为延迟为 ℓ_D 的单位脉冲函数,表示发送端和接收端之间传输距离所引起的时间延迟。式(5)可简写为

$$y_i = g \cdot x_i^{(\ell_D)} + w_i, \quad (6)$$

式中,向量 $\mathbf{x}_i^{(\ell_D)}$ 为被延迟 ℓ_D 码片后的 \mathbf{x}_i 。为了在接收端恢复出发送的符号,对 \mathbf{y}_i 进行相关捕获以识别信道延迟 ℓ_D 是至关重要的。

在捕获过程中,接收机调整本地产生 PN 码的相位,并与接收信号进行相关运算,即互相关 r_i 为

$$\begin{aligned} r_i &= \mathbf{p}_{\text{ref}}^T \cdot \mathbf{y}_i \\ &= g\mathbf{p}_{\text{ref}}^T \cdot \mathbf{x}_i^{(\ell_D)} + \mathbf{p}_{\text{ref}}^T \cdot \mathbf{w}_i, \quad (7) \\ &= g s_i \mathbf{p}_{\text{ref}}^T \cdot \mathbf{p}^{(\ell_D)} + \mathbf{p}_{\text{ref}}^T \cdot \mathbf{w}_i \end{aligned}$$

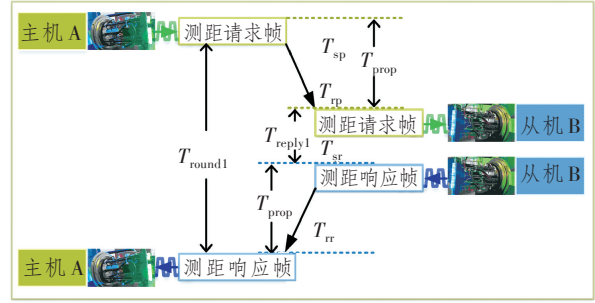
式中, \mathbf{p}_{ref} 为接收机端产生的参考 PN 码,其与发射端 PN 码具有相同的内容,但是具有可调的、不同的相位偏移。当 \mathbf{p}_{ref} 的相位偏移与发射 PN 码经信道相位偏移后信号 $\mathbf{p}^{(\ell_D)}$ 相同时,互相关 r_i 具有最大值,即捕获到信号。由此,可通过不断调整接收机本地 PN 码 \mathbf{p}_{ref} 的相位偏移,与接收信号做相关,实现捕获过程。

捕获可以将接收到的信号与本地 PN 码的相位误差控制在 1 个码片以内,但接收信号与本地 PN 码之间仍可能存在微小的相位和频率偏差。此偏差在长时间累积后,会导致两者逐渐失去同步引起相位失配,进而使整个接收过程失败。为解决这一问题,捕获完成后,系统会进入跟踪阶段。跟踪算法通过跟踪环路来控制本地 PN 码的相位时钟,从而实现接收信号与本地 PN 码之间相位误差的持续补偿,确保两者保持精确的相位匹配。

1.3 测距系统模型

实际测距系统存在一个不可忽视的问题:发送端和接收端通常会使用不同的晶振,这些晶振具有不同的频率稳定性^[8]。因此发送端和接收端的时钟之间会存在一定的基准误差,通常被称为钟差,钟差的存在会显著影响测距精度。尤其是在实时通信感知场景中,测距双方无法进行时钟同步时,这一问题更加突出。为了解决异步时钟问题,本文将双向异步测距引入到了 OICAR 系统中。

双向异步 PN 码测距原理如图 2 所示。主机 A 主要负责发送信息帧与测距请求帧,从机 B 则负责发送信息帧与测距响应帧,图中省略了信息帧的发送过程。在测距过程中,主机 A 按固定周期发送测距请求帧,记录此时的时间为请求发送时间 T_{sp} 。经过真实信道延迟时间 T_{prop} (可看作 ℓ_D^A)后,测距请求帧到达从机 B,从机 B 记录此时的时间为请求到达时间 T_{rp} 。从机 B 也按固定周期发送测距响应帧,记录响应帧发送时间为 T_{sr} ,该帧携带回应测距标志位、 T_{rp} 和 T_{sr} 信息。测距响应帧同样经过真实信道



注: T_{round1} 为完成一次双向通信所消耗时间; T_{reply1} 为从机从接收数据、处理数据到发送数据的一次通信过程所消耗的时间。

图 2 双向异步 PN 码测距原理图

Figure 2 Asynchronous duplex PN code-based ranging process

延迟时间 T_{prop} (此时可看作 ℓ_D^B) 后回传到主机 A 端,主机 A 记录此时的时间为回应到达时间 T_{rr} 。主机 A 解包该测距响应帧得到 T_{rp} 与 T_{sr} 信息。最终主机 A 端根据以上 4 个时间计算环回时间 T_{round1} 、回应时间 T_{reply1} 以及真实信道延迟时间 T_{prop} ,其公式为

$$T_{\text{round1}} = T_{\text{rr}} - T_{\text{sp}}, \quad (8)$$

$$T_{\text{reply1}} = T_{\text{sr}} - T_{\text{rp}}, \quad (9)$$

$$T_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{round1}} - T_{\text{reply1}}}{2}. \quad (10)$$

通过上述方式,能够有效消除主机 A 与从机 B 之间由于晶振稳定度不同而导致的 ℓ_D^A 与 ℓ_D^B 之间的时间偏差。对于通信系统,所有的时延信息都由码偏移量表示,然而,这无法满足测距精度需求。因此,在 OICAR 测距方案中,本文不仅利用 PN 码的码偏移量这一“粗刻度”来估计距离,还通过引入 FCW 这一“细刻度”对“粗刻度”进行细化,从而大幅提升了测距精度。具体而言,PN 码的生成需要数字控制振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)的参与。NCO 在系统时钟下根据 FCW 进行积分,当积分量达到 NCO 积分器的最大范围时,NCO 输出 PN 码所需的频率时钟,驱动 PN 码生成器。换言之,PN 码的每一个相位状态都是由一次 FCW 积分过程完成的。理论上,只要 NCO 积分器的位宽足够大(量程足够高),就能够在原理上无限提高测距精度。因此,在图 2 所示的测距过程中,时间点 T_{sp} 的采样对应主机 A 发送端 NCO 的码片和 FCW;时间点 T_{rp} 的采样对应从机 B 接收端 NCO 的半码片和 FCW;时间点 T_{sr} 的采样对应从机 B 发送端 NCO 的码片和 FCW;而时间点 T_{rr} 的采样则对应主机 A 接收端 NCO 的半码片和 FCW。由此,即可完成高精度测距功能。

2 通信测距一体化系统硬件设计

实时 ISCAR 系统整体硬件架构如图 3 所示。架构整体组成包括 LED 阵列、LED 驱动板、光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT)、接收信号放大电路、模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)模块、Zynq 核心控制板和上位机。发射过程由上位机提供发射信号,Zynq 的处理系统(Processing System, PS)端下达指令给可编程逻辑(Programmable Logic, PL)端。PL 端将信号进行调制扩频后,控制驱动经过 LED 阵列发射信号。在接收端,PMT 接收到的光信号经放大电路和 ADC 模块采样后,由 PL 进行解扩与解调,符号与测距结果通过 PS 计算后呈送到上位机。

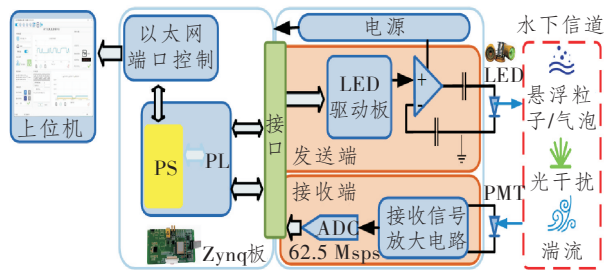


图 3 OICAR 系统的整体硬件架构

Figure 3 The hardware framework of OICAR system

OICAR 系统发射端整体架构如图 4 所示,虚线部分为 PL,通过 Zynq 芯片的 PL 端实现。PS 端将要发送的数据通过高级可扩展接口(Advanced eXtensible Interface, AXI)总线传递给 PL 端的符号生成模块,符号生成模块将此数字符号处理成固定的帧格式,其中数字符号的调制方式为 NRZ-OOK 调制。同时根据 Zynq 芯片中 PS 设置的扩频因子,发射端的 NCO 通过 PN 码生成模块生成相应周期的 PN 码序列。之后,帧数据与 PN 码序列一起输入到扩频模块中实现扩频调制。扩频信号经过 LED 驱动后经由 LED 阵列发送,形成扩频信号无线光波。

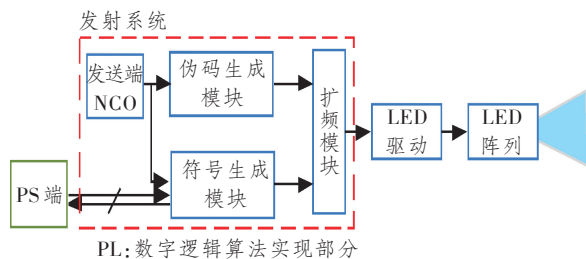


图 4 OICAR 系统发射端框图

Figure 4 The hardware structure of the transmitter of the proposed OICAR system

OICAR 系统接收端如图 5 所示。其整体流程为,光信号被 PMT 接收后转换为微弱电信号。该电信号经过电流放大电路后被 ADC 模块采样,ADC 采样数据被输入到 Zynq 芯片的 PL 端进行解扩解调。虚线框内部分为接收系统在 PL 端实现的算法,其中包含接收端 NCO、捕获算法、跟踪算法和帧同步。系统中的捕获和跟踪算法对接收到的扩频信号进行同步和时间信息的获取,帧同步模块用于识别接收符号帧的起始,之后系统将数据符号与时间信息传递至 PS 端。

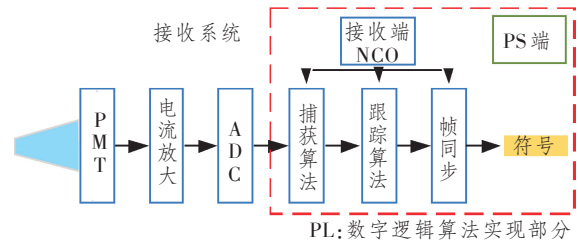


图 5 OICAR 系统接收端框图

Figure 5 The hardware structure of the receiver of the proposed OICAR system

3 实验验证

3.1 硬件与实验参数设置

系统硬件整体结构与部件示意图如图 6 所示。其中系统的外部结构主要由抗压玻璃、机械外壳和密封组件等部分组成。光学透镜的焦距为 3.5 cm,透光率超过 98%。机械外壳采用黄铜材料制成,壁厚为 6 mm,能够承受 100 m 深度处水压。尾部通过两个水密封胶圈密封,外部通过水密线缆供电,并与上位机进行网络通信。

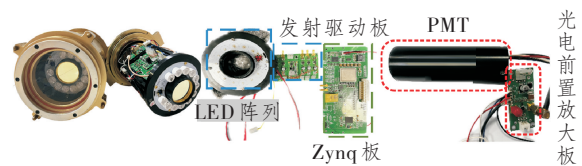


图 6 系统硬件整体结构与部件示意图

Figure 6 The used optical transceiver and components of the system

为了验证 OICAR 系统在通信与测距方面的性能,本文在西北工业大学长安校区翱翔实验室的拖曳水池中开展了相关实验。图 7 所示为在拖曳水池中进行的实验设置,共分为 4 个子图进行说明,如图 7(a)所示,由于无法利用航车对 OICAR 系统进行固定,本次实验中发送绿色 LED 信号的系统被固定安装在廊桥上,下潜深度为 2 m;如图 7(b)所示,发送蓝色 LED 信号的系统则通过可移动的杠

杆支架手动调节位置,下潜深度同样为 2 m,根据实验需要变化距离;如图 7(c)所示,实验距离测量依靠拖曳水池旁的标定刻度线进行,发送绿色 LED 信号的系统一直被固定在标定位置 164.5 m 处,当蓝色 LED 信号的系统位于 101 m 处时,两系统间的相对距离即为 63.5 m;图 7(d)所示为实验现场图,本次实验的距离范围为 13.5~63.5 m,每隔 5 m 进行一次测试。发射机和接收机其余相关参数如表 1 所示。

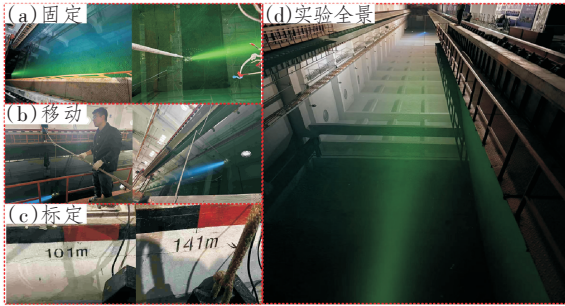


图 7 拖曳水池水下实验设置

Figure 7 The experimental scenario of the underwater optical system

表 1 OICAR 系统参数设置

Table 1 The parameters of the proposed system

系统参数	设置数值
LED 阵列功率(12 个)/W	12
LED 的 3 dB 带宽/ MHz	5
LED 波长/nm	450~480, 500~560
系统时钟/AD 采用时钟/ MHz	62.5
1/T _{chip} :扩频码率/Mchip/s	4.9
1/T _{symbol} :符号速率/ kbit/s	19.216
A:PN 码的 LFSR 长度	8
L:PN 码周期长度	255
PN 码生成多项式	$PN_1 = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ $PN_2 = x^8 + x^6 + x^5 + x^2 + 1$

注:LFSR 为多级移位寄存器。

3.2 水体光传播特性分析

拖曳水池中 UWOC 系统通信机的光信号实测衰减情况如表 2 所示,其中“-”表示未采集数据。在拖曳水池中,随着距离的增加,两种 LED 信号(蓝色和绿色)在接收端的及时码相关峰值均呈下降趋势。对蓝色 LED 信号而言,在 13.5 m 时仍有较高的相关峰值(约 60.74 dB),随后在 23.5 m 时降至 49.50 dB 左右。随着距离的增大,蓝色 LED 信号逐渐跌至 0 dB,表明系统已无法进行有效解扩。在实际实验中,38.5 m 时系统还可以接收到蓝色 LED 信号,但 38.5 m 之后及更远距离处,蓝色

LED 信号已淹没在噪声中,或者散射角过大已经无法到达接收端 PMT 处。可以判断,在实验所用水体中,蓝色 LED 信号最远有效传输距离为 38.5 m。对于绿色 LED 信号来说,由于较短距离实验时未采集数据,其在 28.5 m 距离处的相关峰值达到 60.82 dB,与蓝色 LED 在 13.5 m 时的水平相当。此后,随着距离的增加,绿光的相关峰值虽有所下降,但仍在长距离内保持可检测的相关峰值。例如,在 33.5 和 38.5 m 距离下,绿色 LED 信号的相关峰值仍能维持在 50 dB 以上的水平(58.20 与 57.03 dB),明显优于同等距离下已无法检测到信号的蓝色 LED。直至 63.5 m 时,绿色 LED 信号的相关峰值下降至 41.85 dB,测试上位机显示系统一直处于跟踪状态但无法进入到帧同步状态。本文推测虽然信号可以捕获,但跟踪环路无法稳定,说明 PMT 可以接收到一些扩频信号,但由于扩频信号太过微弱,导致跟踪环路失效。因此本文认为绿色 LED 信号最远有效传输距离为 63.5 m。

表 2 拖曳水池中光信号衰减情况

Table 2 The optical signal attenuation in the watertank

距离/m	蓝光相关峰 均值	对应 dB	绿光相关峰 均值	对应 dB
13.5	1 185 970	60.74	-	-
18.5	-	-	-	-
23.5	89 089	49.50	-	-
28.5	99 388	49.97	1 206 557	60.82
33.5	63 507	48.03	660 252	58.20
38.5	-	-	504 650	57.03
48.5	0	0	127 512	51.06
58.5	0	0	32 305	45.09
63.5	0	0	15 312	41.85

3.3 扩频通信性能

在扩频系统中,成功捕获跟踪信号即意味着成功建立通信链路,并实现信息传输,也即在 13.5~63.5 m 的距离范围内,通信符号的误码率(Bit Error Rate, BER)为 0。以上位机收到的距离为 58.5 m 时的符号为例,如图 8 所示。实验设置符号持续发送“00 12 36 A6 E9 DB 57 F9 44 11 8A 77”(十六进制)。而在 PS 端对符号帧数据进行组包时,会按长度(Length)、时间(Time)和数据(Data)进行打包,其中数据以十六进制表示。图中,数据包的长度为 1 029 字节,时间为 2024 年 11 月 21 日 19 时 04 分。由后续数据可知,帧头为“ee16”,接下来的两个字节表示时间戳,后续的 4 个字节为空白位,接下来的

24个字节为数据部分。接收到的数据符合系统规定的帧结构协议,且数据无误。

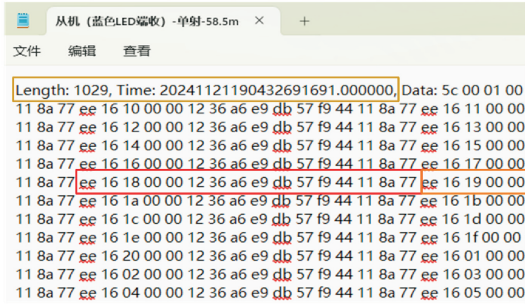


图8 接收到的蓝色LED发送的符号(距离为58.5 m)

Figure 8 Received symbols emitted by blue LED array (The distance is 58.5 m)

3.4 基于扩频通信系统测距性能

由于蓝色LED信号在38.5 m后就无法接收到了,因此本实验仅获得了13.5~38.5 m范围内的测距数据。图9所示为OICAR系统在该距离区间内的测量均值与测量误差。横轴为真实距离,范围为13.5~38.5 m;纵轴为系统测得的距离均值。蓝色虚线表示测量结果均值曲线,红色误差棒展示了各测点的测量误差范围,其误差棒范围为 $\pm 1\sigma$, σ 为多次实测误差的标准差,误差值在图中以具体数值标注。例如实际距离为13.5 m的系统测量误差为0.221 28 m,表明在测量13.5 m时,其测量结果在 $\pm 0.221 28$ m内波动。由图可知,测量结果整体与实际距离呈良好的线性关系,表明OICAR系统保持了较高的测距稳定性。然而,随着实际距离的增加,测量误差逐渐减小并未完全消除,误差值范围从13.5 m处的0.221 28 m逐步下降到38.5 m处的0.184 48 m。测距总体保持在合理范围内,且误差值波动较小,表明OICAR系统中的通信与测

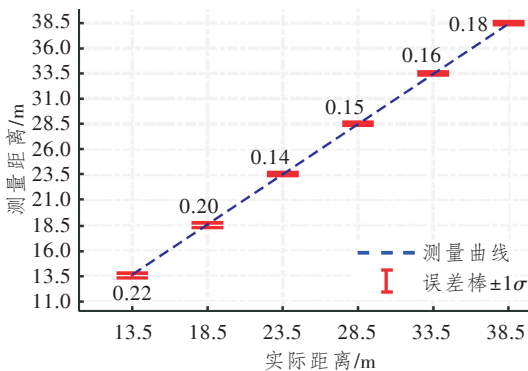


图9 OICAR系统在不同距离下的测距性能

Figure 9 The ranging performance of the proposed OICAR system

距一体化技术在实际应用中具备较好且稳定的通信与测距性能。

综上所述,针对OICAR系统的通信能力,蓝色LED在所测试水体中的极限扩频通信距离为38.5 m。相比之下,绿色LED在所测水体中的极限扩频通信距离为63.5 m。此外,OICAR系统在通信过程中所具备的实时测距能力的测距精度可保持在 ± 0.25 m以内。

4 结束语

本文利用扩频通信信号良好的自相关特性实现了OICAR系统,并采用LED阵列和现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)处理系统搭建了实时硬件实现系统,为水下无线OISAC系统的发展提供了系统验证。实验结果表明,本文搭建的硬件系统可在同一硬件平台上利用相同频谱资源实现扩频通信和高精度测距功能。

参考文献:

- [1] Khalil R A, Saeed N, Babar M I, et al. Bayesian Multidimensional Scaling for Location Awareness in Hybrid-Internet of Underwater Things[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(3): 496-509.
- [2] Yang X, Tong Z, Zhang H, et al. 7-M/130-Mbps LED-to-LED Underwater Wireless Optical Communication based on Arrays of Series-connected LEDs and a Coaxial Lens Group[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(17): 5901-5909.
- [3] Ishibashi S, Susuki K I. 1 Gbps \times 100 m Underwater Optical Wireless Communication Using Laser Module in Deep Sea [C]//OCEANS 2022. VA, USA: IEEE, 2022: 9976975.
- [4] Yang X, Zhang Y, Hua Y, et al. 50-m/300-Mbps Underwater Wireless Optical Communication Using Incoherent Light Source[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(22): 6939-6948.
- [5] Weidemann A, Fournier G R, Forand L, et al. In Harbor Underwater Threat Detection/Identification Using Active Imaging[C]//Photonics for Port and Harbor Security. Florida, USA: SPIE, 2005: 59.
- [6] Cheng Z, Yang K, Han J, et al. Improved Time-of-flight Range Acquisition Technique in Underwater Lidar Experiments [J]. Applied Optics, 2015, 54 (18) : 5715-5725.
- [7] Zha B T, Yuan H L, Tan Y Y. Ranging Precision for Underwater Laser Proximity Pulsed Laser Target De-

- tection [J]. Optics Communications, 2019, 431: 81–87.
- [8] Lin X, Yang S, Liao Y. Backward Scattering Suppression in an Underwater LiDAR Signal Processing based on CEEMDAN-fast ICA Algorithm [J]. Optics Express, 2022, 30(13): 23270–23283.
- [9] 王熹, 邓磊, 陶坤宇, 等. 空间激光通信与测距一体化研究 [J]. 光通信研究, 2024(3): 23001601.
- Wang X, Deng L, Tao K Y, et al. Research on the Integration of Space Laser Communication and Ranging [J]. Study on Optical Communications, 2024 (3) : 23001601.
- [10] 左金鑫, 张大卫, 聂俊缘, 等. 基于Delta-sigma调制的多频相位激光测距 [J]. 光通信研究, 2022(1): 1–5.
- Zuo J X, Zhang D W, Nie J Y, et al. Multi-frequency Phase Laser Ranging based on Delta-sigma Modulation [J]. Study on Optical Communications, 2022(1) : 1–5.
- [11] 万欣, 王浩川, 叶洋, 等. 水下逆反射光通感一体化系统性能研究 [J/OL]. 光通信研究, (2025-04-07) [2025-04-24]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1266.TN.20250422.1632.004>.
- Wan X, Wang H C, Ye Y, et al. Performance Investigation of Underwater Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System [J/OL]. Study on Optical Communications, (2025-04-07) [2025-04-24]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1266.TN.20250422.1632.004>.