

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240013.

无线通信技术

张优,胡芳仁,赵晓燕,等.基于改进型曼彻斯特编码的UWOC解调算法设计[J].光通信研究,2025(2):240013.

Zhang Y, Hu F R, Zhao X Y, et al. Design and Implementation of Modulation and Demodulation Algorithm for UWOC based on Improved Manchester Coding[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240013.

## 基于改进型曼彻斯特编码的UWOC解调算法设计

张优<sup>1</sup>,胡芳仁<sup>1</sup>,赵晓燕<sup>2</sup>,周军<sup>2</sup>,王启龙<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院,南京 210023;

2. 南京先进激光技术研究院,南京 210038)

**摘要:**【目的】为了满足高速水下无线光通信(UWOC)技术工程化的要求,改善高速率通信时开关键控(OOK)等依赖阈值解调的调制方式在水下信道较差时通信误码率(BER)较高的问题,文章对常用的水下光通信调制方式进行了对比仿真分析,提出了一种脉冲位置调制(PPM)和曼彻斯特编码相结合的、无阈值判决的改进型调制解调算法。【方法】文章通过滑动均值滤波提高系统信噪比(SNR);对PPM帧头进行并行多路无阈值判决实现帧同步,为曼彻斯特编码解调提供时间校准基础;最后在数据部分使用曼彻斯特编码副帧头和里德-所罗门(RS)纠错码实现低BER的高速通信。在现场可编程门阵列(FPGA)上对该算法进行了设计实现,搭建了使用该方法的UWOC系统,在不同环境和距离下进行了BER测试。【结果】测试结果表明,基于文章所提解调算法的UWOC系统在通信速率为50 Mbit/s、通信距离为10 m时,在室内清澈水池中的BER为 $10^{-5}$ ,近岸湖水中的BER为 $10^{-3}$ 。【结论】在10 m距离的近岸湖水中,相较于OOK和PPM等调制方法,使用文章所提改进型曼彻斯特编码调制可以实现更可靠的50 Mbit/s通信。

**关键词:**曼彻斯特编码;水下无线光通信;脉冲位置调制;并行无阈值解调

**中图分类号:**TN929.1 **文献标志码:**A

### Design of a Demodulation Algorithm for UWOC based on Improved Manchester Coding

ZHANG You<sup>1</sup>, HU Fangren<sup>1</sup>, ZHAO Xiaoyan<sup>2</sup>, ZHOU Jun<sup>2</sup>, WANG Qilong<sup>2</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Nanjing Advanced Technology Laser Research Institute, Nanjing 210038, China)

**Abstract:** 【Objective】To meet the requirements of the engineering of high-speed Underwater Wireless Optical Communication (UWOC) technology, and to address the issue of high Bit Error Rate (BER) in underwater channels when using modulation methods such as On/Off Keying (OOK) that rely on threshold demodulation for high-speed communication, this paper conducts comparative simulation analysis of commonly used underwater optical communication modulation methods and proposes an improved modulation and demodulation algorithm that combines Pulse Position Modulation (PPM) with Manchester encoding and does not require threshold decision-making. 【Methods】The paper uses sliding mean filtering to improve the Signal to Noise Ratio (SNR). The frame synchronization is then achieved by parallel multi-path threshold-free decision-making on the PPM frame header, providing a time calibration basis for Manchester encoding and demodulation. Finally, high-speed communication system with low BER is realized by using Manchester encoding sub-frame headers and Reed-Solomon (RS) error-correcting codes in the data part. The algorithm is designed and implemented on a Field Programmable Gate Array (FPGA), and a UWOC system using this method is built to conduct BER tests under different environments and distances. 【Results】The test results show that the UWOC system based on this demodulation algorithm has an BER of  $10^{-5}$  in indoor clear water pools and  $10^{-3}$  in nearshore lake water at a communication speed of 50 Mbit/s and a communication distance of 10 m. 【Conclusion】The proposed algorithm in this paper is applied in nearshore lake water with a distance of 10 meters, compared to modulation methods such as OOK and PPM, using modified Manchester encoding modulation can achieve more reliable 50 Mbit/s communication.

**Key words:** Manchester code; UWOC; PPM; parallel demodulation without threshold

## 0 引言

水下无线光通信(Underwater Optical Wireless Communication, UWOC)具有频带资源丰富、传输速率高和安全性高等显著优势<sup>[1-5]</sup>,在各种水下作

业中使用越来越广泛。现阶段长距离UWOC常用的调制方式有开关键控(On/Off Keying, OOK)、脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)和数字脉冲间隔调制(Digital Pulse Interval Modulation, DPIM)等<sup>[6]</sup>。2019年,韩彪使用472 nm的蓝光发

收稿日期:2024-03-18; 修回日期:2024-04-04; 纸质出版日期:2025-04-10

作者简介:张优(1999-),男,河南郑州人。硕士,主要研究方向为水下无线激光通信系统设计与实现、FPGA光通信调制解调算法。

通信作者:张优,硕士。E-mail: zyou3619@163.com

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

光二极管(Light Emitting Diode, LED)和光电倍增管,采用OOK调制,实现了距离为9.6 m、速率为20 Mbit/s的通信<sup>[7]</sup>;2018年,米乐使用PPM在110 m距离实现了12 kbit/s的数据传输<sup>[8]</sup>。除此之外,还有许多研究者采用这几种调制设计了UWOC系统<sup>[9-10]</sup>。在这几种调制方法中,PPM符号长度固定,抗干扰能力强,但是其传输速率低;OOK实现简单但抗干扰能力较差,高速通信下误码率(Bit Error Rate, BER)较高;DPIM与PPM相比提高了带宽利用率<sup>[11]</sup>,但其符号长度不固定,需要使用阈值判别脉冲位置,增加了通信的不稳定性。

曼彻斯特编码是一种广泛使用的编码方案,其确保在每个码元中进行一次电平跳变,不含直流量<sup>[12]</sup>。同速率下,其带宽需求小于PPM和DPIM,且解调不依赖阈值,相较DPIM和OOK等方法更可靠。本文结合PPM和曼彻斯特编码符号长度固

定的特点,提出了无阈值解调的高速光通信调制解调方法,在保证较低BER的同时,较大地提升了系统的通信速率。同时对上述4种调制方法进行了仿真,设计和搭建了使用曼彻斯特编码方法的UWOC系统并进行了水下性能测试。

## 1 改进型曼彻斯特编码算法设计

### 1.1 水下常用调制方法对比仿真

#### 1.1.1 带宽

将发送的数据设为 $n$ ,位宽为 $m$ ,OOK的带宽需求设为 $R_b$ 。假设DPIM每个数据出现的概率是平均的,则OOK、PPM、DPIM与曼彻斯特编码的符号结构依次如图1(a)~图1(d)所示。在没有噪声干扰时,4种调制方式的带宽需求如表1所示。3种调制方式在相同通信速率时的带宽需求如图2所示。

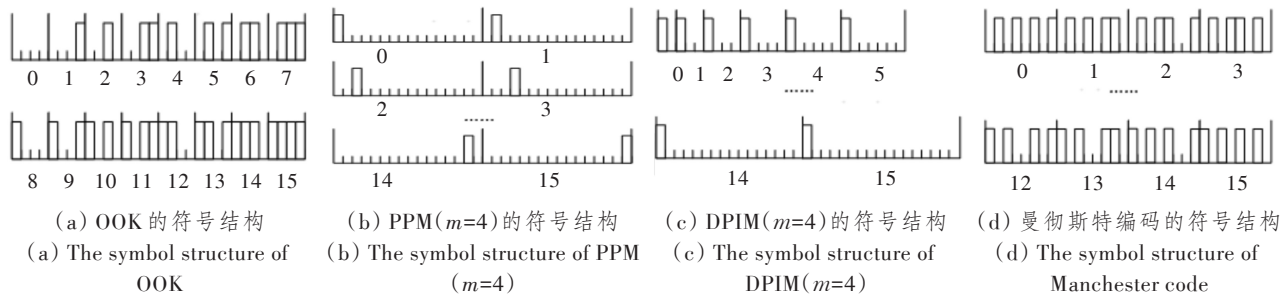


图1 长距离UWOC常用调制方式的符号结构

Figure 1 The symbol structures of common modulation methods for long-distance UWOC

表1 4种UWOC调制方式的带宽需求

Table 1 Bandwidth requirements for four UWOC modulation methods

调制方式	带宽需求
OOK	$R_b$
PPM	$\frac{2^m R_b}{m}$
DPIM	$\frac{(3+2^m)R_b}{2m}$
曼彻斯特编码	$2R_b$

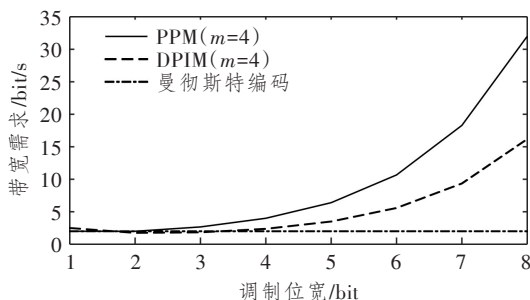


图2 3种调制方式在相同通信速率时的带宽需求

Figure 2 The bandwidth requirements of three modulation methods at the same communication rate

由图和表可知,曼彻斯特编码的带宽需求是OOK的两倍,远低于PPM和DPIM,所以在相同脉宽条件下,使用曼彻斯特编码传输数据能得到更高的速率;并且随着调制位宽的增加,曼彻斯特编码的优势更加明显。

#### 1.1.2 BER

光信号在水下比在空气中衰减更加强烈,这是因为光信号在水介质中会受到散射、吸收和湍流的影响。假设发射端与接收端距离固定,在不考虑码间串扰(Inter-Symbol Interference, ISI)的情况下,接收端在 $t$ 时刻接收到的信号 $y(t)$ 可表示为

$$y(t) = Lx(t) + h(t), \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为在 $t$ 时刻发射端发出的调制信号; $L$ 为水下信道的传输损耗因子; $h(t)$ 为湍流和气泡引起的低频噪声<sup>[13-14]</sup>。Shannon定理(Shannon, 1948)指出,在具有有限信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)的信道上可以支持的最大比特率 $R_{bitmax}$ 为

$$R_{bitmax} = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_S}{P_N} \right), \quad (2)$$

式中： $W$  为信道的带宽； $P_s$  为接收端的信号功率； $P_N$  为接收端的噪声功率。由式(2)可知，高速率通信需要高带宽和高 SNR<sup>[15-16]</sup>。为了得出 4 种调制方式 BER 与 SNR 的关系，本节在 Gaussian 加性白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道下使用 Matlab 仿真软件对根据式(1)建立的水下信道模型进行仿真<sup>[17]</sup>。湍流造成的信号波动由正弦信号进行模拟，则 UWOC 系统 BER 的仿真模型为

$$y_{\text{receive\_signal}} = y_{\text{Gauss\_noise}} + y_{\text{sin\_noise}}, \quad (3)$$

式中： $y_{\text{receive\_signal}}$  为接收信号； $y_{\text{Gauss\_noise}}$  为 AWGN 信号； $y_{\text{sin\_noise}}$  为加性正弦噪声信号。在发送信号中添加 AWGN 和正弦噪声，其 SNR 满足以下公式：

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}, \quad (4)$$

式中： $R_{\text{SN}}$  为 SNR； $P_{\text{signal}}$  为发送信号的功率； $P_{\text{noise}}$  为 AWGN 的功率。 $P_{\text{signal}}$  可表示为

$$P_{\text{signal}} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} x(k)^2}{N}, \quad (5)$$

式中： $N$  为发送信号序列的长度。

式(3)中的  $y_{\text{Gauss\_noise}}$  由 Matlab 仿真软件中的  $\text{awgn}()$  函数实现：

$$y_{\text{Gauss\_noise}} = \text{awgn}(y_{\text{original\_signal}}, R_{\text{SN}}, 'measured'), \quad (6)$$

式中： $y_{\text{original\_signal}}$  为发送端的原始信号；'measured' 参数表示  $\text{awgn}()$  函数将计算输入信号的功率值，并结合  $R_{\text{SN}}$  参数生成噪声信号。 $\text{awgn}()$  函数可将 AWGN 添加到发送信号  $y_{\text{original\_signal}}$  中得到指定 SNR 的输出信号。发送一段随机序列，在信号调制位宽为 4 的情况下，分别将该随机序列调制为 OOK、PPM、DPIM 和曼彻斯特编码 4 种信号格式，4 种调制信号的脉冲幅度为 10。通过  $\text{awgn}()$  函数添加 AWGN 后，继续添加幅值为 2 的低频正弦噪声  $y_{\text{sin\_noise}}$ ，最后得到模拟的水下接收信号  $y_{\text{receive\_signal}}$ ，图 3 所示为  $R_{\text{SN}}=2$  时的发送信号图像和接收信号图像。

分别对 OOK、DPIM、PPM 无阈值解调法和有阈值解调法以及曼彻斯特编码进行解调仿真。以发送信号幅值的 1/2 作为阈值进行 OOK、DPIM、PPM 有阈值方法的解调，用无阈值方法进行 PPM 和曼彻斯特编码的解调。解调完成后，使用  $\text{biterr}()$  函数对比解调后的数据和发送的原始数据，得到误比特数和 BER。通过改变  $\text{awgn}()$  函数的  $R_{\text{SN}}$  参数，求得在不同 SNR 下 5 种解调方式的 BER 性能。将该传输随机序列的调制解调过程循环仿真

1 000 次后取平均值，得到 BER 与 SNR 的关系曲线如图 4 所示。由图可知，在各种 SNR 下，BER 最低的两种解调方式是使用无阈值解调的 PPM 和曼彻斯特编码。故本文提出了一种将 PPM 和曼彻斯特编码相结合的改进型曼彻斯特编码调制方式，在保证 BER 性能的情况下进一步提高通信速率。

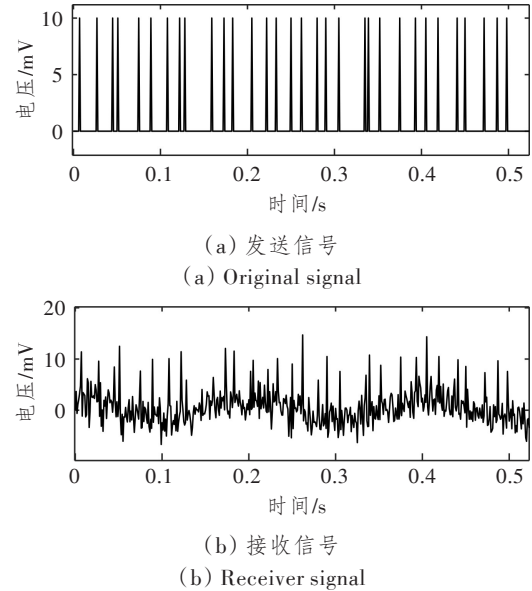


图 3  $R_{\text{SN}}=2$  时的 PPM 发送信号和接收信号图像

Figure 3 PPM raw signal and received signal image at  $R_{\text{SN}}=2$

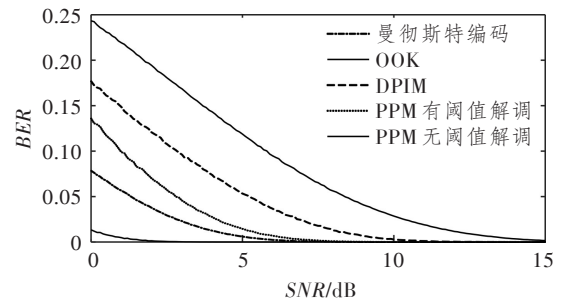


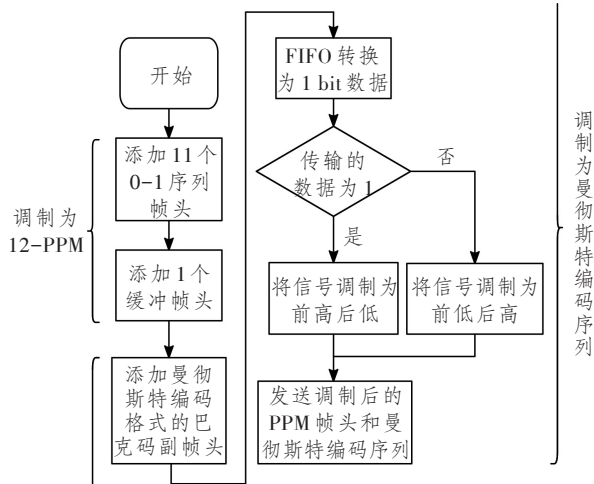
图 4 5 种解调方式的 BER 与 SNR 的关系

Figure 4 BER and SNR relationship of the five demodulation methods

## 1.2 调制算法设计

曼彻斯特编码拥有带宽宽、不需要阈值参与解调和无直流分量等突出特性，其解调所需的帧同步和位同步由 PPM 格式的帧头和曼彻斯特编码格式的副帧头来保证。本算法的帧头使用 12-PPM 格式，曼彻斯特编码部分采用 G. E. Thomas 在 1949 年提出的曼彻斯特编码表示方法，其规则为每个码元都使用两个不同相位的电平信号表示，当电平信号在两个相位中从高到低跳变，就表示传输数据“1”，电平信号在两个相位中从低到高跳变，就表示传输数据“0”。

图5所示为改进型曼彻斯特编码的调制过程。



注:FIFO为先进先出存储器。

图5 改进型曼彻斯特编码的调制过程

Figure 5 The modulation process of improved Manchester coding

第1部分是12-PPM格式的帧头数据,将传输1个12-PPM数据的重复单元称为1个符号单元(Symbol Unit, SU),则帧头SU的个数为12,依次传输11个0-1序列帧头和1个缓冲帧头。1个SU包含12个时隙(Time Slot, TS),12个TS中有1个TS为高电平,其余为低电平,每个TS持续

3个时钟周期(Clock Cycle, CLK)。图5第2部分为曼彻斯特编码,其1个码元传输1bit信息。码元包含两个电平,每个电平持续2个CLK,该部分由巴克码副帧头和用户发送数据组成。

### 1.3 解调算法设计

#### 1.3.1 滑动均值滤波

使用ADS5474对光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)输出的电信号进行采样,对采样后的数据进行滑动均值滤波处理,消除毛刺的影响。滑动均值滤波的输入序列 $x_i$ 与输出序列 $y_i$ 的关系为

$$y_i = \frac{\sum_{j=i-n+1}^i x_j}{n}, \quad (7)$$

式中: $i$ 为累加的结束值; $j$ 为累加的起始值; $n$ 为 $i$ 和 $j$ 之间数据的个数。因为解调需要得到的是脉冲的位置信息,所以滑动均值滤波使用 $n$ 个数据的和代替,节省现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)资源且实现简单。因为1个TS持续3个CLK,所以滑动均值滤波的 $n=3$ 。

滑动均值滤波效果如图6所示,由图可知,滑动均值滤波模块能有效消除PPM信号脉冲之外的毛刺,提高了系统的抗干扰性能。

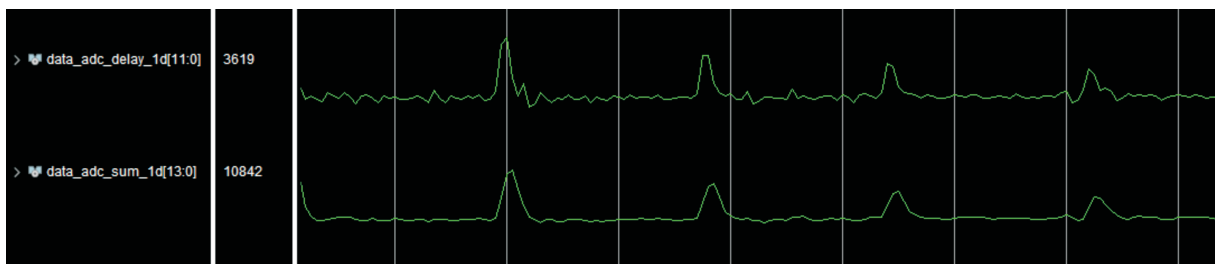


图6 滑动均值滤波模块前后数据图

Figure 6 Data graphs before and after the sliding mean filtering module

#### 1.3.2 帧头无阈值并行解调方法

PPM帧头解调的关键就在于如何判断高电平脉冲的位置,传统的有阈值解调法需要手动给出阈值,进行高低电平判决,该方法可靠性差。本文使用无阈值解调方法,示意图如图7所示。图中前4行展示了从模数转换器(Analog Digital Converter, ADC)采样到1个SU的转换关系,每1行前都标注了该行单个格子的名称及CLK个数。本算法帧头部分的1个PPM SU包含36个CLK,利用PPM SU长度是固定的这一特点,对SU中的36个CLK进行计数,记录每1个SU中最大值对应的CLK计数值,该计数值用于计算相邻SU中最大值之间的间隔,若该间隔大小满足对应0-1序列帧头

的值,则代表对应的帧头匹配成功。SU中最大值间隔 $I$ 可表示为

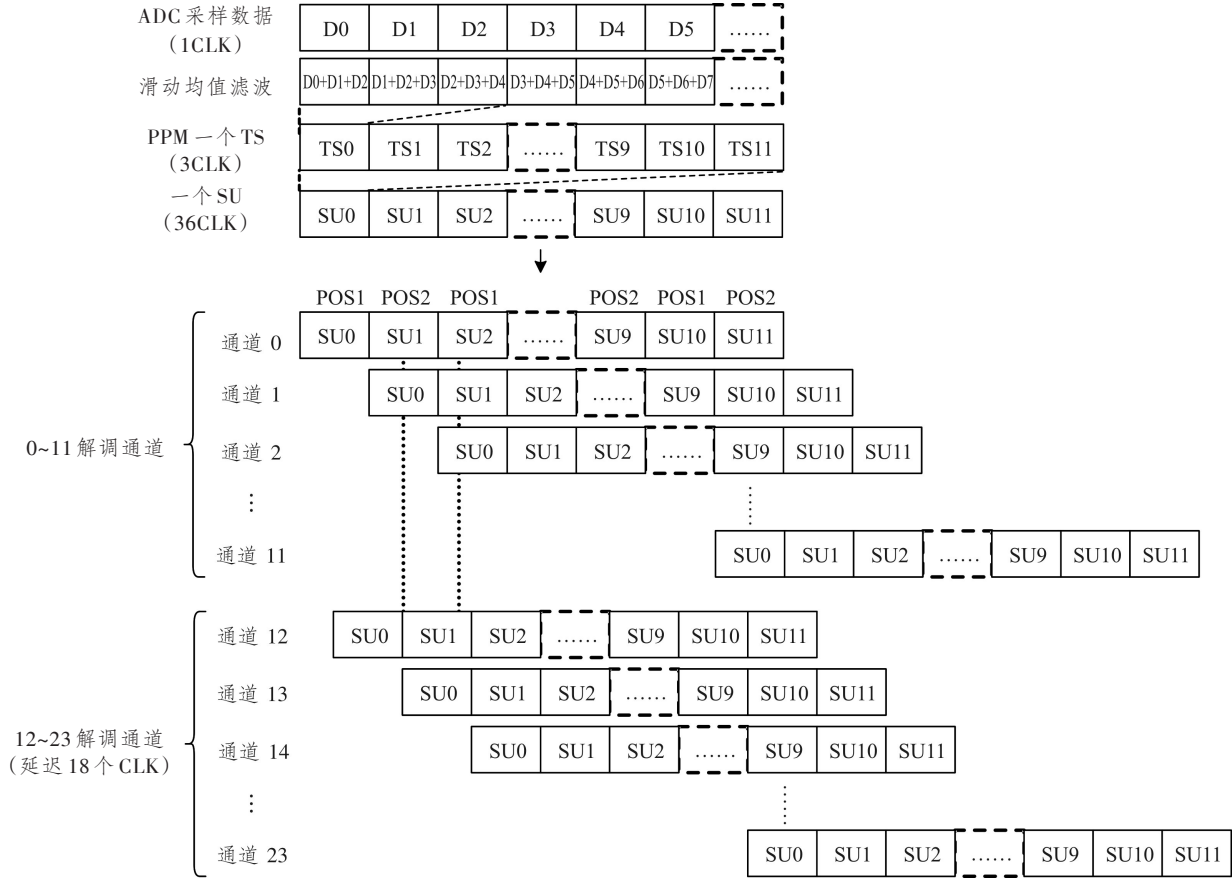
$$I = \begin{cases} 36 - X_{POS1} + X_{POS2} \\ 36 - X_{POS2} + X_{POS1} \end{cases}, \quad (8)$$

式中, $X_{POS1}$ 和 $X_{POS2}$ 分别为偶数和奇数SU中最大值对应的CLK计数值。图7中0~11解调通道是对最大值间隔 $I$ 是否满足对应帧头的判别通道。因为每一个SU都有可能是帧头序列的第一个,所以需要以每一个SU为开端,设置12条并行解调通道(通道0~11)。PPM的高电平TS持续3个CLK,高电平可能出现在两个SU的交界处,导致其最大值间隔 $I$ 计算错误。为了避免出现这种情况,将0~11解调通道延时18个CLK,得到新的12条解调

通道(通道 12~23)。

本算法帧头的调制方式没有借助阈值进行数据判别,且帧头不再按照先判定后解调的步骤,而是对

任何 ADC 输入数据都当作帧头进行解调,直到数据符合帧头时,才会将数据与解调成功的通道进行对齐。该方式极大地提高了帧头的解调成功率。



注:  $D_x$  为 ADC 采样数据序列;  $TS_x$  为 PPM 实习序列;  $SU_x$  为 PPM 符号单元序列。

图 7 帧头无阈值并行解调示意图

Figure 7 Schematic diagram of threshold free parallel demodulation for frame headers

图 8 所示为 PPM 帧头解调的程序实现图,由 FPGA 的 ila 抓取,第 1 行是 ADC 的采样数据,第 2 行是 24 条并行解调通道中成功匹配帧头的 1 条,每个通道设置了 12 个 bit 位用于标志对应的帧头是否解调成功。因为 11 个 0-1 序列一共可以得到 10

个间隔数据,再加上 1 个缓冲帧头不需要判断,所以当出现解调通道标志位等于 0011\_1111\_1111 时,就表示帧头匹配成功。在帧头匹配成功后,所有的并行通道都停止解调帧头,等待所有数据解调完成后继续进行帧头匹配。

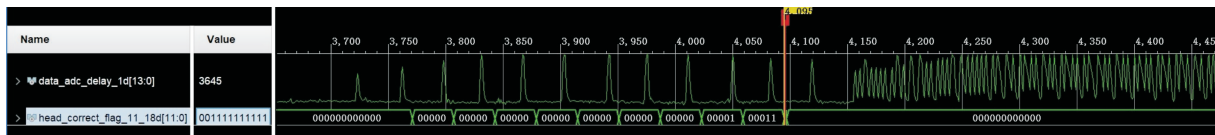


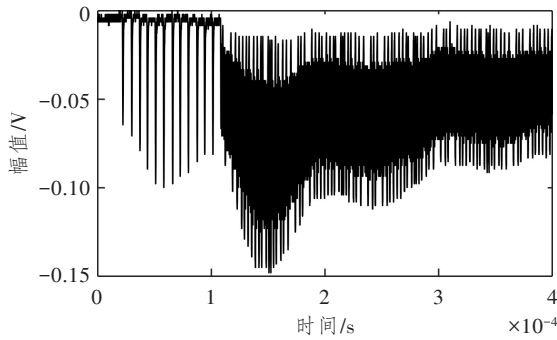
图 8 无阈值并行解调程序实现

Figure 8 Implementation of thresholdless parallel demodulation program

### 1.3.3 曼彻斯特编码数据解调

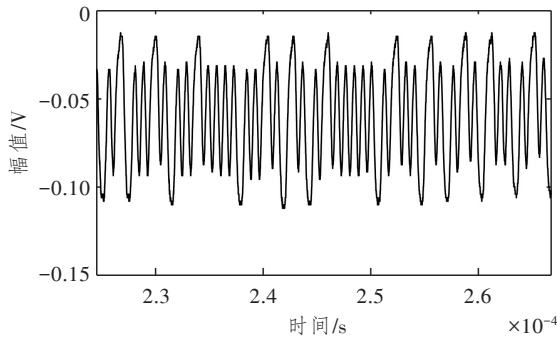
图 9(a)所示为接收端 PMT 输出的示波器图像,信号分为两部分,第 1 部分为 12-PPM 格式的 12 个帧头数据;第 2 部分为携带传输信息的曼彻斯特编码信号。虽然第 1 部分的 PPM 信号实现了帧同步,但是因为 PPM 的 1 个 TS 持续 3 个 CLK,所

以 PPM 校准后的帧头数据可能会前后偏移 1 个 CLK。为了进一步实现位同步,将曼彻斯特编码解调分成相互之间相差 1 个 CLK 的 3 条并行解调通道,并且在曼彻斯特编码数据前添加由 13 位巴克码组成的副帧头,用于辨别哪一路的数据解调是正确的。



(a) 接收端 PMT 信号整体图像

(a) Overall image of the PMT signal at the receiving end



(b) 接收端 PMT 信号部分图像

(b) Partial image of the PMT signal at the receiving end

图 9 接收端 PMT 信号图像

Figure 9 Image of PMT signal at the receiving end

在解调曼彻斯特编码时,对其码元内两个电平分别采样两次,将每个电平的两次采样结果相加之后进行大小比较即可得出其传输的信息。这种方式避免了使用阈值进行符号判别,调制解调程序简单,安全可靠。图 9(b)所示为将曼彻斯特编码信号放大之后的图像,由图可知,曼彻斯特编码高低电平幅值稳定,解调难度小。

## 2 系统搭建与性能测试

UWOC 系统总体框图如图 10 所示,该系统分为发射端和接收端。上位机通过用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 下发数据,数据经过双倍速率同步动态随机存储器 (Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory, DDR SDRAM) 缓存之后进行里德-所罗门 (Reed-Solomon, RS) 纠错码编码,之后调制为改进型曼彻斯特编码格式的光信号。光信号经水下信道被接收端的 PMT 探测并转换为电信号,电信号经过模/数转换后送入 FPGA 中进行解调和 RS 解码,最后将解码后的数据通过网口发送到上位机,完

成信息的传输。信号调制解调部分采用 Xilinx 公司的 Kintex7 系列 FPGA 实现;光/电转换部分由 450 nm 波长的蓝光、520 nm 的绿光激光二极管 (Laser Diode, LD) 及其高速驱动电路组成,具有全双工通信的能力。接收部分为了防止光的后向散射对解调造成影响,在 PMT 前端加装了滤光片,隔绝自干扰。

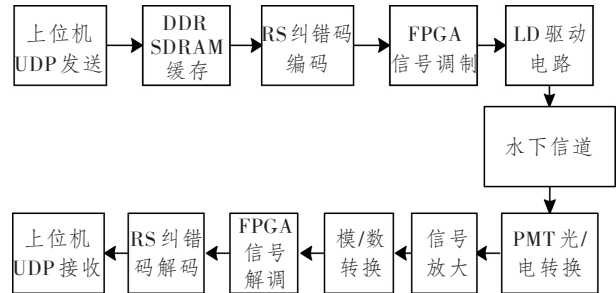


图 10 UWOC 系统总体框图

Figure 10 Overall block diagram of UWOC

在室内水池和室外湖水分别进行测试。图 11(a)所示为室内搭建的水下光通信系统测试平台,水池长 10 m,在水池内加入工业盐和氢氧化铝模拟浑浊海水信道,接收端和发射端位置固定在水池两端;图 11(b)所示为在安基山水库进行测试的图像,测试时使用浮球将两个终端漂浮在水下 1 m 处,测试在不同距离时,以 50 Mbit/s 速率传输 1 个 50.5 MB 文件的 BER,在 3 种环境中重复测试 20 次后取平均值,测得改进型曼彻斯特编码调制在不同距离下的 BER 如表 2 所示;图 11(c)所示为 50 Mbit/s 通信速率时接收端网口的速率截图;图 11(d)所示为接收文件与原文件进行第三方软件对比后的误码情况图;图 11(e)所示为上位机接收字符串时的图片,可以看出字符串接收无误码。

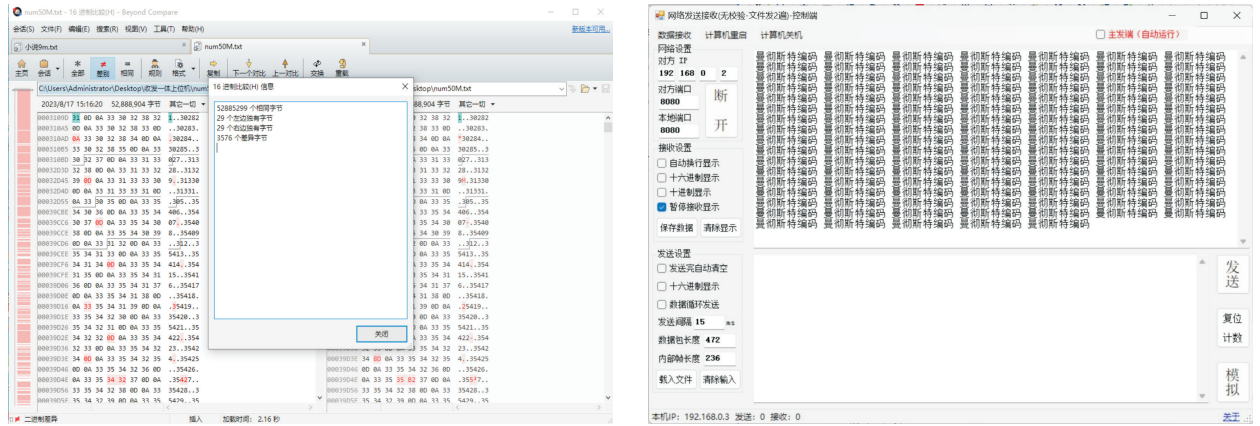
表 2 不同距离下改进型曼彻斯特编码解调 BER

Table 2 BER of improved Manchester encoding and demodulation at different distances

信道类型	距离/m	BER
清澈水池	5	$4.233 \times 10^{-5}$
	7	$6.346 \times 10^{-5}$
	10	$9.275 \times 10^{-5}$
模拟海水水池	5	$7.069 \times 10^{-5}$
	7	$9.512 \times 10^{-5}$
	10	$1.142 \times 10^{-4}$
近岸湖水	5	$3.944 \times 10^{-4}$
	10	$4.446 \times 10^{-3}$



(a) 水池通信测试 (b) 安基山水库通信测试 (c) 50 Mbit/s 下水口速率  
 (a) Water tank communication test (b) Communication testing of Anjishan reservoir (c) 50 Mbit/s Ethernet port speed



(d) 50 Mbit/s 下收发文件软件对比结果图 (e) 上位机接收字符串数据  
 (d) Comparison result chart of file sending and receiving software at 50 Mbit/s (e) The host computer receives string data

图 11 UWOC 测试环境及其验证方法

Figure 11 The test environment and verification methods for UWOC

### 3 结束语

本文首先对 PPM、OOK、DPIM 和曼彻斯特编码 4 种 UWOC 调制方式进行了仿真,论证了 PPM 和曼彻斯特编码在 BER 性能和通信速率方面的优势,然后提出了 PPM 和曼彻斯特编码相结合的改进型曼彻斯特编码调制解调算法。通过滑动均值滤波进行数据预处理,提高了信号的 SNR;使用 RS 纠错码和无阈值解调方法降低了系统解调 BER。在 FPGA 上完成了该算法调制解调程序的编写,并在室内水池和室外湖水中,在不同的通信距离下对 UWOC 系统进行了测试。基于该调制解调算法的通信系统,在室内 10 m 距离的清澈水池中,通信速率为 50 Mbit/s 时,BER 为  $9.275 \times 10^{-5}$ ;在室外湖水中,通信距离为 10 m,通信速率为 50 Mbit/s 时,BER 为  $4.446 \times 10^{-3}$ 。综上,改进型曼彻斯特编码调制方法比 PPM 拥有更高的通信速率,相比于 OOK 更加稳定可靠,适合用于水下信道实现高速光通信。

### 参考文献:

- [1] 杜劲松,周田华,陈卫标,等. 基于LDPC和PPM的水下光通信性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 100-106.  
 Du J S, Zhou T H, Chen W B, et al. Performance Analysis of Underwater Optical Communication based on LDPC and PPM[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 100-106.
- [2] 刘鹏展,王林宁,胡芳仁,等. 水下光通信技术的研究与展望[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 329-334.  
 Liu P Z, Wang L N, Hu F R, et al. Research and Prospect of Underwater Optical Communication Technology [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2022, 5(4): 329-334.
- [3] Duntley S Q. Light in the Sea[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(2): 000214.
- [4] 满仲麒,谭玉彬,刘显著,等. 高速水下无线光通信系统研究进展[J]. 光通信研究, 2023(4): 1-6.  
 Man Z Q, Tan Y B, Liu X Z, et al. Research Progress of High-speed Underwater Wireless Optical Communi-

- cation System [J]. Study on Optical Communications, 2023(4):1-6.
- [5] 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 R P, Tong S F, Zhang P, et al. Research on Underwater Optical Communication Technology [J]. Study on Optical Communications, 2023(4):11-13.
- [6] 林志琦, 宋国明, 刘涛, 等. 车辆间大气激光移动通信调制方式研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(2): 334-338.  
Lin Z Q, Song G M, Liu T, et al. Modulation Schemes of Mobile Atmosphere Laser Communication between Autos [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 334-338.
- [7] 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), 2019.  
Han B. Study on the Bidirectional Underwater Wireless Optical Communication for Deep Sea Application [D]. Xi'an, China: University of Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS), 2019.
- [8] 米乐, 胡思奇, 周田华, 等. 基于低密度奇偶校验码和脉冲位置调制的水下长距离光通信系统设计 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 225-231.  
Mi L, Hu S Q, Zhou T H, et al. Long Distance Underwater Laser Communication System based on Low-density Parity Check Codes and Pulse-position Modulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 225-231.
- [9] Qi Z, Wang L, Liu P, et al. Full-duplex Underwater Wireless Blue Light Communication [J]. Optics Express, 2023, 31(6): 9330-9338.
- [10] Huang X, Yang F, Song J. Hybrid LD and LED-based Underwater Optical Communication: State-of-the-art, Opportunities, Challenges, and Trends [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100002.
- [11] 柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展 [J]. 光电工程, 2022, 49(3): 3-21.  
Ke X Z, Liang J Y, Xu D S, et al. Research Progress of Pulse Position Modulation Technology in Optical Wireless Communication [J]. Opto-Electronic Engineering, 2022, 49(3): 3-21.
- [12] 吴凡. 无线激光通信中基于双伽马信道的反曼彻斯特码研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.  
Wu F. Research on IMC over Gamma-Gamma Channel in WLC [D]. Xi'an, China: Xidian University, 2018.
- [13] Cochenour B M, Mullen L J, Laux A E. Characterization of the Beam-spread Function for Underwater Wireless Optical Communications Links [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(4): 513-521.
- [14] Oubei H M, ElAfandy R T, Park K H, et al. Performance Evaluation of Underwater Wireless Optical Communications Links in the Presence of Different Air Bubble Populations [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 7903009.
- [15] Shannon C E. A Mathematical Theory of Communication [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [16] Lacovara P. High-bandwidth Underwater Communications [J]. Marine Technology Society Journal, 2008, 42(1): 93-102.
- [17] 王庆港. 基于极化码的水下无线光通信系统设计与算法改进 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.  
Wang Q G. Research on Underwater Wireless Optical Communication System based on Polar Codes [D]. Xi'an, China: Xidian University, 2023.