

基于 OOK 调制的水下高速激光通信系统设计与实现

龚从安¹, 胡芳仁^{1*}, 赵晓燕², 周 军²

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023; 2. 南京先进技术激光研究院, 南京 210038)

摘要: 为了满足水下高速激光通信的需求和提高系统的误码性能, 设计一种基于二进制开关键控(OOK)调制的水下高速激光通信系统, 采用滑窗平均滤波方法对接收数据进行去噪处理, 根据固定值阈值和自适应阈值方式求取联合阈值后进行门限判决。系统测试结果表明: 联合阈值判决方式的误码性能优于固定阈值判决和自适应阈值判决方式; 系统在洁净水、水中含少量悬浮杂质 2 种水质通信时的误码率分别为 0 、 10^{-2} 左右。

关键词: 可见光通信; 开关键控; 联合判决; 数据预处理; 抗干扰能力

中图分类号: TN92 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)01-0013-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and implementation of underwater high-speed laser communication system based on OOK modulation

GONG Congan¹, HU Fangren^{1*}, ZHAO Xiaoyan², ZHOU Jun²

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

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

Abstract: In order to meet the requirements of underwater high-speed laser communication and improve the error code performance of the system, an underwater high-speed laser communication system based on on-off keying (OOK) modulation is designed. The sliding window average filtering method is used to denoise the received data, and the threshold decision is made after the joint threshold is obtained according to the fixed threshold and the adaptive threshold. The system test results show that the bit error performance of the joint threshold decision mode is better than that of the fixed threshold decision mode and the adaptive threshold decision mode. The bit error rate of the system is about 0 and 10^{-2} respectively when communicating with clean water and water containing a small amount of suspended impurities.

Key words: visible light communication, on-off keying, joint judgment, data preprocessing, anti-interference capability

0 引言

水下激光通信技术利用蓝绿激光作为信息载体, 因具有带宽宽、传输速率高和保密性好等优点而得到迅猛发展。相比声波传输和电磁传输等技术, 水下激光通信技术在传输速率上体现出无可比拟的优势。

开关键控(OOK)作为一种操作简单、解调方便的

数字调制方式在水下通信中应用广泛。2020 年, 哈尔滨工程大学的夏思远^[1]设计了基于 OOK 调制及 LED 阵列的水下全双工光通信系统, 在误码率为 10^{-4} 时实现了 27 m 的传输距离。但是, 该系统未对信号进行抗干扰处理, 导致在水质环境较差时误码率较高。因此, 为了提高系统的误码性能, 本文根据水下信道特征和 OOK 信号模型, 引入数据去噪处理、联合阈值判决技术, 设计一种基于 OOK 调制的水下高速激光通信系统。

1 水下光传播衰减规律与 OOK 信号模型

光信号在水中受到的衰减与空气中类似, 都符合指数衰减规律^[2-3]。本文提出的水下高速激光通信系统采用蓝绿激光进行通信, 因此只考虑单色光的传播特性^[4]。

本文采用 OOK 信号表示激光脉冲强度, “1”表示

收稿日期: 2022-02-24。

作者简介: 龚从安(1995—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院光学工程专业, 主要从事水下激光通信系统设计、基于 FPGA 的通信调制解调算法研究和滤波去噪等通信算法优化的相关工作。

*** 通信作者:** 胡芳仁(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光微机电系统、化合物半导体以及集成光电子器件与系统。



龚从安, 胡芳仁, 赵晓燕, 等: 基于 OOK 调制的水下高速激光通信系统设计与实现

有激光脉冲, “0”表示无激光脉冲, 因此 OOK 时域表达式^[5]为

$$s(t)_{\text{OOK}} = \sum_{k=0}^K S_m \times P(t - KT) \quad (1)$$

其中, K 为自然数; S_m 为二进制序列, 取值为 1 或者 0; t 为采样时间, $P(t)$ 为发射端脉冲整形函数, T 为码元周期。

由于 OOK 信号是一种随机脉冲序列, 对其进行傅里叶变换时, 其频域为一常数, 因此只能用功率谱描述其频率特性。单极性非归零码-开关键控 (NRZ-OOK) 信号对应的功率谱密度^[6]为

$$P(f) = \frac{T_b}{4} S_a^2(\pi f T_b) + \frac{1}{4} \delta(f) \quad (2)$$

其中, T_b 为单个码元高电平持续时间 (码元长度), f 为基带信号频率, $S_a(\pi f T_b)$ 为抽样函数, $\delta(f)$ 为离散脉冲。式 (2) 中, 第一项为连续谱, 第二项为离散谱, 离散谱不包含有用信息。NRZ-OOK 信号能量主要集中于第一个连续谱, 通常用连续谱第一个零点来定义信号的带宽。在水下激光脉冲调制中, 由于 NRZ 不包含定时信息, 因此本文设计的系统将在解调端通过帧同步的方法提取调制解调的同步信息。

2 系统设计

本文设计的基于 OOK 调制的水下高速激光通信系统框图如图 1 所示。系统由发射端、水下信道和接收端组成, 其中的现场可编程门阵列 (FPGA) 通信板是基于 Xilinx 公司的 Kintex7 芯片处理器设计的。系统参数设置如下: 激光二极管 (LD) 光源输出波长为 532 nm 的绿光, 发射光功率为 1 W; 发射端、接收端 2 端的工作电压均为 12 V, 工作电流为 3 A, 准向通信开角 (全角) $\leq 60^\circ$; 设备与上位机之间通过百兆网连接, 调制频率为 200 MHz。在发射端, OOK 调制后的电信号通过 LD 驱动电路驱动 LD 发光; 在接收端, 采用滨松光子公司的光电倍增管 (PMT) 探测激光信号, 再将信号经采

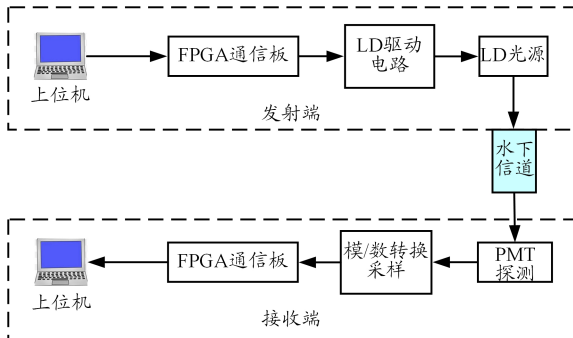


图 1 基于 OOK 调制的水下高速激光通信系统框图

样频率为 125 MHz 的模/数转换器采样后输入 FPGA 通信板进行信号处理, 并最终在接收端的上位机上显示。系统实物图如图 2 所示。

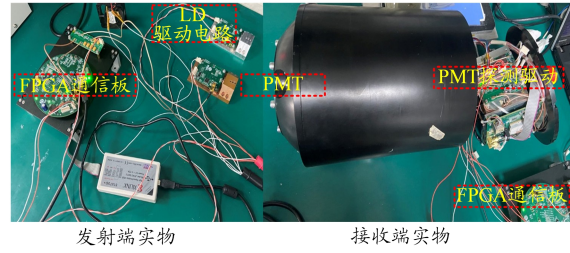


图 2 水下高速激光通信系统组成实物图

3 信号处理

3.1 数据去噪处理

滑窗平均滤波是有限元脉冲响应 (FIR) 滤波的一种特例^[7-8]。滑窗平均滤波在抑制噪声的同时可以保留比较陡峭的边沿, 适用于激光脉冲信号去噪处理。理论上, 滑窗窗口值越大, 噪声被抑制得越明显, 但是过大的窗口值会导致波形过拟合, 最后无法正确解调, 因此合适的窗口大小至关重要。滑窗平均滤波器的频率响应表达式为

$$H(e^{j\omega}) = \frac{\sin\left(\frac{\omega W}{2}\right)}{\omega W/2} \quad (3)$$

其中, W 为滑窗窗口大小, ω 为频率。由式 (3) 可知, 频率响应为一个矩形脉冲。当 $H(e^{j\omega}) = 0.707$ 时, 代入 $\omega = 2\pi f_c$ 化简可得

$$W = \frac{0.443 \times F_s}{f_c} \quad (4)$$

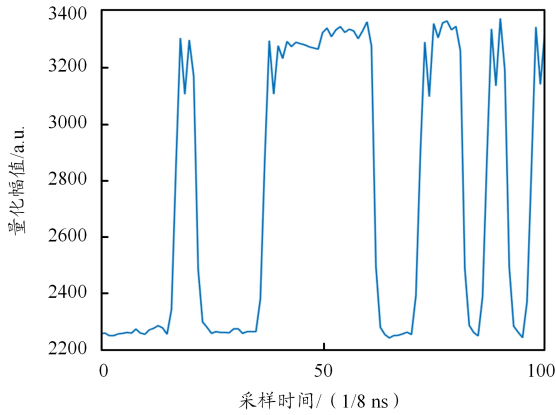
其中, F_s 为系统采样频率。将 $F_s = 125$ MHz、截止频率 $f_c = 12$ MHz 代入式 (3), 算出窗大小约为 5。采集数据预处理前后的波形如图 3 所示。可以看出, 与原始数据相比, 经过预处理后信号变得更加平滑, 噪声得到了有效抑制, 因此降低了解调误码率。

3.2 联合阈值判决

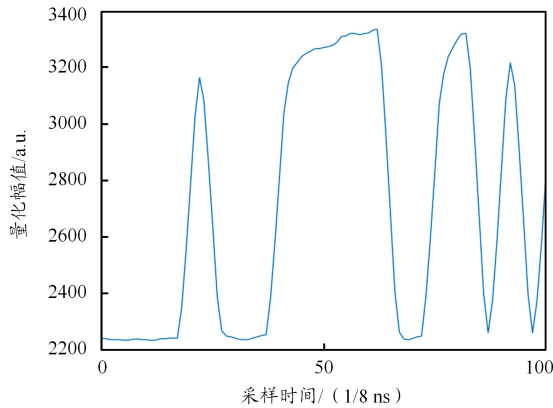
OOK 信号是一种先验等概确知信号, 因此可以对其进行最佳接收设计^[9-10]。水下 OOK 通信随机信道中, 信号功率主要为发送码元“1”时的功率, 发送“0”时功率为 0。因此, 二进制最佳误码率的判决门限为

$$S_T = \frac{S_1 + S_0}{2} = \frac{S_1}{2} \quad (5)$$

其中, S_1 和 S_0 分别为发送码元“1”、“0”时的信号幅度。强度调制信号通常采用非相干解调, 通过设定固定阈值或自适应阈值的方式进行门限判决。由于水下复杂环境的影响, 信号幅度波动明显, 固定阈值无法适应



(a) 原始数据



(b) 数据去噪处理后

图3 数据去噪处理前后的波形对比

多变的水下环境,导致误判概率增大、系统误码性能下降。

自适应阈值是基于累加求平均思想,将 N 个采样值按先后顺序存入寄存器中,然后通过右移的方式计算平均值。自适应阈值的表达式为

$$V_a = \frac{\sum_{k=1}^N S_k(t)}{n} \quad (6)$$

其中, n 为自适应阈值平均点数, $S_k(t)$ 为当前采样点。

自适应阈值的缺点是容易出现计算过拟合,当自适应阈值较小时导致码元“0”判决错误。

为了降低水下湍流的影响,同时保持在整个数字信号处理过程中的最佳接收门限值,本文结合固定阈值和自适应阈值,求取联合阈值 E_v 为

$$E_v = \frac{S_a + S_v}{2} \quad (7)$$

其中, S_a 表示上位机预设门限值。 E_v 值不仅保持了门限值总体的最佳范围,也确保不会出现过拟合现象,仿真结果如图4所示。在稳定洁净水池链路中改变信号信噪比,比较固定阈值、自适应阈值和联合阈值3种判

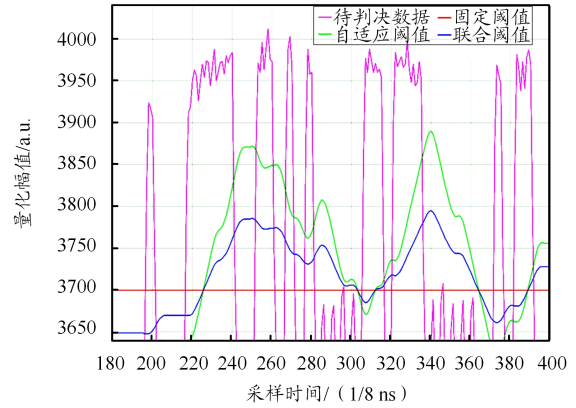


图4 3种阈值曲线

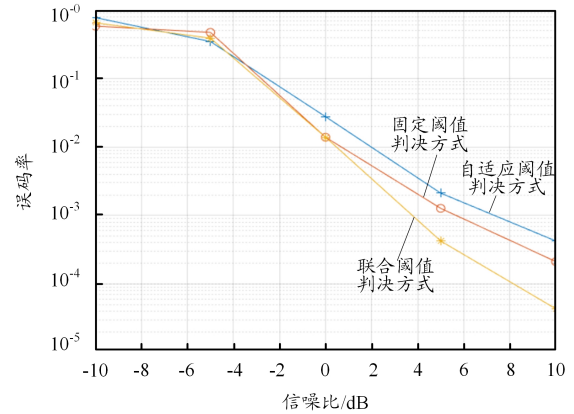


图5 3种判决方式的误码率对比

决方式的误码率对比情况如图5所示。可以看出,信噪比较低时,固定阈值判决方式与联合阈值、自适应阈值2种判决方式的误码率相近;在信噪比较高时,联合阈值判决方式的误码性能优于固定阈值和自适应阈值判决方式。因此,联合阈值判决方式更加适合于环境复杂的水下基带信号传输解调系统。

4 系统测试

本文搭建的水下通信系统测试实验平台如图6所示。

在发送端,数据源数据经上位机发送、FPGA通信板处理(对数据进行缓冲整形成帧和并/串转换,调制成所需的码元宽度)和LD驱动电路后驱



图6 水下通信系统测试实验平台

龚从安, 胡芳仁, 赵晓燕, 等: 基于 OOK 调制的水下高速激光通信系统设计与实现

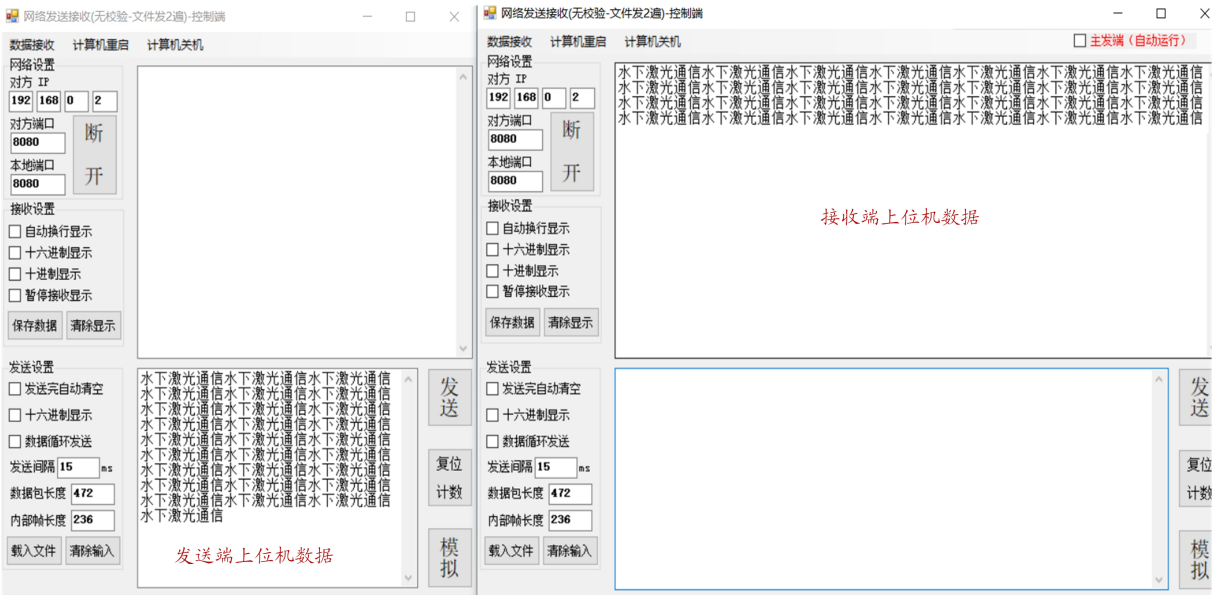


图 7 水下高速激光通信系统测试结果

动 LD 发光。在接收端, 首先对采集到的激光脉冲(包含时钟信息、噪声分量)进行峰值检测, 找到帧数据起点; 然后采用改进的联合判决方式进行码元恢复, 检测出帧头, 完成数据恢复, 并将恢复的数据发至上位机显示。水下高速光通信系统测试结果如图 7 所示。可以看出, 系统接收端未出现错误字符。

根据水下光信道衰减效应特点, 本文将通信距离和水质环境作为变量进行对比测试, 具体测试参数设置情况如下: 发送 8 帧字符数, 每帧 236 字节, 分别在传输距离为 5 m 和 10 m 的水下链路进行测试。在接收端利用 Beyond Compare 软件对比收发字符, 得到测试结果如表 1 所示。多次实验结果表明: 在洁净水链路中, 当信噪比为 9 dB 左右时, 系统在 10 m 洁净水链路中可以实现 25 Mb/s 无误码传输; 在水中含少量悬浮杂质链路中, 当信噪比为 5 dB 左右、传输距离为 10 m 时, 误码率为 10^{-2} 左右, 依然保持着较高的解调性能。

表 1 不同信噪比下系统误码率性能

水质	距离 /m	信噪比 /dB	字符错误数 /个	误码率
洁净水	5	9.82	0	0
洁净水	10	9.79	0	0
水中含少量悬浮杂质	10	4.6	19	1.0063×10^{-2}
水中含大量悬浮杂质	10	1.24	591	3.1303×10^{-1}

5 结束语

本文设计并验证了基于 OOK 调制的水下激光高速通信系统, 通过改进接收端判决方式, 提高了系统水下抗干扰性能。仿真分析了 3 种判决方式的系统误码率, 结果显示采用联合判决方式的系统误码性能优异。该系统可以在水下完成实时无线通信, 且拥有高可靠性和高传输速率的优点, 在海洋水下探索应用场景中具有极大的工程价值。

参考文献:

[1] 夏思远. 基于 OOK 调制及 LED 阵列的水下全双工光通信系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.

[2] 黎洪松. 光通信原理与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

[3] 樊昌信. 通信原理[M]. 第七版. 北京: 国防工业出版社, 2012.

[4] 林虎. 水下激光通信技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.

[5] 王许浦, 孙晓红, 薛琦. 基于 FPGA 的 OOK 可见光通信系统仿真与实现[J]. 现代电子技术, 2020, 43(17): 25–28, 33.

[6] 英赫, 刘向田. 可见光通信预均衡器的仿真设计与研究[J]. 信息技术与信息化, 2021(2): 163–165.

[7] 罗强, 刘景元. 高速数传中改进的 CIC 滤波器的仿真与实现[J]. 通信技术, 2020, 53(8): 1869–1872.

[8] WANG D, WU T B, GUO F, et al. Block fast FIR algorithm and circuit design [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1827: 012004-1–012004-10.

[9] BAGHDADY J, MILLER K, MORGAN K, et al. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9794–9805.

[10] 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.