

基于 490 nm 垂直外腔面发射激光器的 长距离水下激光通信系统*

王涛¹⁾ 王章行¹⁾ 沈小雨¹⁾ 朱仁江¹⁾ 蒋丽丹¹⁾

陆寰宇²⁾ 路永乐³⁾ 宋晏蓉⁴⁾ 张鹏^{5)†}

1) (重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

3) (重庆邮电大学, 重庆 400065)

4) (北京工业大学物理与光电工程学院, 北京 100124)

5) (重庆师范大学, 重庆国家应用数学中心, 重庆 401331)

(2024 年 6 月 21 日收到; 2024 年 7 月 31 日收到修改稿)

水下无线光通信技术为深海勘探和海洋资源开发利用带来了一种效率高且可靠性强的通信新方案. 本文采用 490 nm 垂直外腔面发射激光器作为光源, 基于声光外调制技术, 采用脉冲位置调制方式 (pulse-position modulation, PPM) 搭建了长距离水下无线光通信系统. 结合光源的优势并经过软判决算法优化 PPM 解调来提升水下通信性能, 采用 64 PPM 调制, 成功实现了 96 m 的水下传输距离, 在 50 MHz 时隙频率下得到传输的误码率为 1.9×10^{-5} . 同时测量到采用软判决解调相较于硬判决解调在性能增益上有着大约 2 dB 的提升, 验证了软判决算法在提升水下通信性能方面相比硬判决算法的显著优势.

关键词: 垂直外腔面发射激光器, 脉冲位置调制, 软判决算法, 水下无线光通信

PACS: 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.73.20240860

1 引言

随着新世纪的到来, 海洋资源的勘探与利用促进了海洋科学技术的快速发展, 也对水下通信技术提出了更高的要求. 在这一背景下, 高效、可靠的水下通信技术成为连接海洋资源与人类文明的重要桥梁, 它的研究和应用受到了前所未有的重视. 传统的水下无线传输方式包括声通信和射频通信, 考虑到水下射频通信和声学通信的功耗、时延、通信速率和距离不兼容等局限性, 研究人员提出了使

用蓝绿光通信作为合适的解决方案^[1,2]. 水下光通信是一种前沿的水下通信方式, 它利用光作为信息载体, 在水下环境中进行无线数据传输. 与传统的射频和声学通信手段相比较, 水下无线光通信因其能够提供较高的数据速率、实现较低的传输时延, 并且不易受到电磁干扰的影响, 而备受瞩目^[3,4], 这为深海勘探和海洋资源利用带来了一种效率高且可靠性强的通信新方案.

在水下无线光通信系统中, 水下环境对光信号传输的影响是至关重要的. 当光波穿越水体时, 其衰减遵循比尔-朗伯定律, 显示出指数级衰减的特

* 重庆市自然科学基金 (批准号: CSTB2024NSCQ-MSX0833)、国家自然科学基金 (批准号: 61975003, 61790584, 62025506)、重庆市教委科技研究计划 (批准号: KJQN202200557, KJQN202300525)、在渝本科高校与中国科学院所属院所合作项目 (批准号: HZ2021007) 和重庆师范大学 (人才引进/博士点) 基金 (批准号: 23XLB003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangpeng2010@cqu.edu.cn

性^[5]. 研究表明, 450—550 nm 波段的蓝绿光在水中传播时吸收引起的能量衰减较小, 如图 1 所示^[6]. 因此目前的水下无线光通信系统中多采用此波段的蓝绿光作为载波^[7].

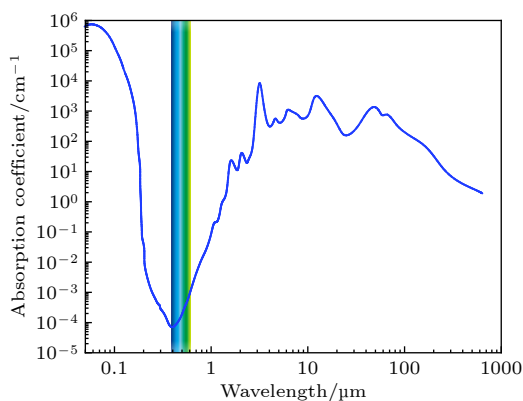


图 1 各波长的光在海水中的吸收系数^[6]

Fig. 1. The absorption coefficients of light of different wavelengths in seawater^[6].

选择适当的调制技术对于有效地恢复信号十分关键. 考虑到相干光通信系统实现的复杂性, 通常水下光通信采用强度调制/直接检测 (IM/DD) 模式^[8]. 在强度调制技术中, 无需将信号先调制到额外的高频载波上, 而是根据基带信号直接改变光强, 导致已调信号大部分功率集中在直流或低频区域^[9]. 如开关键控 (on-off keying, OOK) 和脉冲位置调制 (pulse-position modulation, PPM) 等方案, 这些技术已被广泛应用于水下无线光通信系统. 在 OOK 这种最基本的形式中, 信息序列直接控制光源的强度变化. 而在 PPM 中, 信息是通过脉冲在固定时间框架内的位置变化来表达的, 这种方式通常更加节能, 但是随着调制阶数的增加, 所需的带宽较 OOK 要更高一些, 但同时也具有更好的抗多径干扰性能^[10]. OOK 调制以其简单直接的方式, 在多个研究中实现了高速率、长距离的通信. 例如, 在 2022 年, 浙江大学提出并演示的基于宽带光电倍增管的水下无线光通信系统中, OOK 调制使得系统传输距离提升至 100.6 m, 数据速率达到 3 Gb/s^[11]. 同样, 在 Qi^[12] 等展示的水下光无线通信系统中, OOK 调制方案实现了 4 Mb/s 的双向通信速率和 12 m 的传输距离. Wang 等^[13] 也展示了一种结合 OOK 调制技术的水下光通信系统, 他们利用 520 nm 绿光激光二极管 (LD) 作为光源, 实现了 100 m 的传输距离和高达 500 Mb/s 的数据传输速率, 同时保持了较低的误码率. 另外, Huang

等^[14] 还利用 OOK 调制实现了 12 m 水下及 30 m 空气的跨界质传输. 这些案例表明, OOK 调制在保持系统简单性的同时, 也能满足长距离与高速率的通信需求. 然而, 当面对光子数量较低或信道环境较为复杂的场景时, PPM 调制展现出了其独特的优势. PPM 调制通过时隙的划分和光子数量的控制, 提高了信号的抗干扰能力和可靠性. 例如, 在 2019 年 Shen 等^[15] 的实验中, 即使在每个脉冲时隙期间接收到的入射光子数目少于 100 的条件下, 8—64 PPM 的信号仍然能够实现低于前向纠错标准限制的误码率. 同样, 在 2021 年 Yan 等^[16] 的研究中, 采用 256 PPM 调制和光子计数技术的水下无线光通信 (underwater wireless optical communication, UWOC) 系统达到了高效传输水平, 并保持了较低的误码率. Han 等^[17] 在 2023 年的研究中演示了一种基于 32 PPM 调制的蓝色连续激光水下无线光通信系统, 在衰减系数 $c = 0.51 \text{ m}^{-1}$ 的实验条件下, 该系统成功地实现了 35.64 m 距离的通信链路, 并且通信速率可达 1.9 Mb/s. 为了进一步优化 PPM 调制的性能, 本文引入了软判决算法. 这种算法能够充分地利用接收到的信号信息, 通过概率统计和估计方法, 对接收到的信号进行更精细的处理和判决, 从而进一步提高系统的抗干扰能力和可靠性^[18].

同时, 增加发射端的光功率或缩小光束直径也可以对抗信号的衰减. 这对发送端光源的选择提出了要求. 随着半导体技术快速发展, LD 具有出色的便携性和可操作性, 因此被广泛应用于大多数已报道的长距离 UWOC 系统中^[13,17,19,20]. 但是大功率 LD 所需的驱动电流很大, 并且进行调制具有较大难度, 所以目前市售的可进行直接调制的 LD 的输出功率普遍在几十毫瓦, 同时半导体封装的结构也决定了 GaN 基 LD 难以进一步提高光束质量. 近年来, 垂直外腔面发射激光器 (VECSEL) 技术有了长足的进步, 由于其外腔可设计的特点, 可以根据不同需求进行修改, VECSEL 在产生高输出功率和良好光束质量方面的性能也受到学术界和工业界的广泛关注^[21–24].

本文设计了一种基于 490 nm VECSEL 的 UWOC 系统. 该系统采用声光晶体外调制器 (AOM), 并结合软判决算法的 PPM 调制优化系统通信性能. 在实验室中的 6 m 水箱中通过光反射延长为 96 m

的水下信道进行测试,通过测试验证软判决算法在解调中的优势.采用软判决解调相较于硬判决解调在性能增益上有着大约 2 dB 的提升.最终采用软判决实现了信号带宽频率为 50 MHz 时,接收端信号误码率为 1.9×10^{-5} .这一结果表明,基于软判决算法优化的 PPM 在长距离水下通信中具有优秀的性能表现.

2 实验系统

图 2 是基于软判决改进的水下无线光通信系统示意图.发送端由实验平台上搭建的 VECSEL 光源与声光外调制器组成,其实物如图 2(a) 所示,伪随机序列通过 PPM 调制之后被加载到任意波形发生器中进行数模转换,并传输模拟信号到 AOM 的驱动器对入射光束进行声光调制.焦距较短 ($f_1 = 100$ mm) 的透镜用于在 490 nm 蓝色激光进入 AOM 之前对其进行聚焦,另一侧使用另一个焦距较长 ($f_2 = 300$ mm) 的透镜来准直激光束以减少其发散.

调制后的激光束穿过 6 m 长水箱,在实验中,通过在水箱两侧使用多个反射镜来实现 96 m 的最大通信距离,如图 2(b) 和图 2(c) 所示.输出光束由图 2(d) 所示的透镜聚焦到雪崩光电二极管 (APD) 探测器进行光电转换,由混合信号示波器 (MSO) 进行采集数据,再对信号进行处理,操作包含数字滤波、同步、采样、判决、解码和误码率计算.所有实验均在黑暗环境中进行,以尽量减少光噪声的影响.

2.1 光源设计

半导体增益芯片是整个 VECSEL 系统的核心.实验中使用的蓝光 VECSEL 增益芯片由各种半导体材料层组成,包括具有高铝成分的 AlGaAs 蚀刻停止层、GaAs 保护层、有源区及分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR).有源区由 15 个 InGaAs/GaAsP 量子阱组成,其中 InGaAs 为量子阱层材料, GaAsP 为掩埋量子阱的势垒层.分布式布拉格反射镜由 28 对交替的高铝组分 (低折射率) 和低铝组分 (高折射率) AlGaAs 组成.实验中所设计的增益芯片中心波长为 980 nm,高反射率带宽为 100 nm,基频光的反射率接近 99.9%. VECSEL 芯片经过外延生长、减薄抛光等工艺,最终切成尺寸为 4 mm × 4 mm 的小芯片,然后用钛铂金做金属化处理.之后将芯片焊接至铜散热器和金刚石上,通过化学湿法刻蚀过程去除 GaAs 衬底和蚀刻停止层,然后采用水冷连接铜块对 VECSEL 增益芯片进行散热^[25].

如图 3 所示,实验中使用的蓝色激光器具有直腔结构.通过光纤耦合,将 808 nm 泵浦半导体激光经准直聚焦系统后,以 30° 的入射角聚焦在 VECSEL 增益芯片上.随后将 10 mm 的三硼酸锂 (LBO) 倍频晶体放在谐振腔内尽可能靠近增益芯片的位置,即光腰处,以提高其倍频转换效率.最终经过倍频晶体产生 490 nm 的蓝色激光.

构建好光腔后,对蓝光 VECSEL 的光学性能进行测量.图 4 是使用光谱仪 (HORIBA iHR320) 测量的 VECSEL 基频和倍频光谱.蓝光的中心波

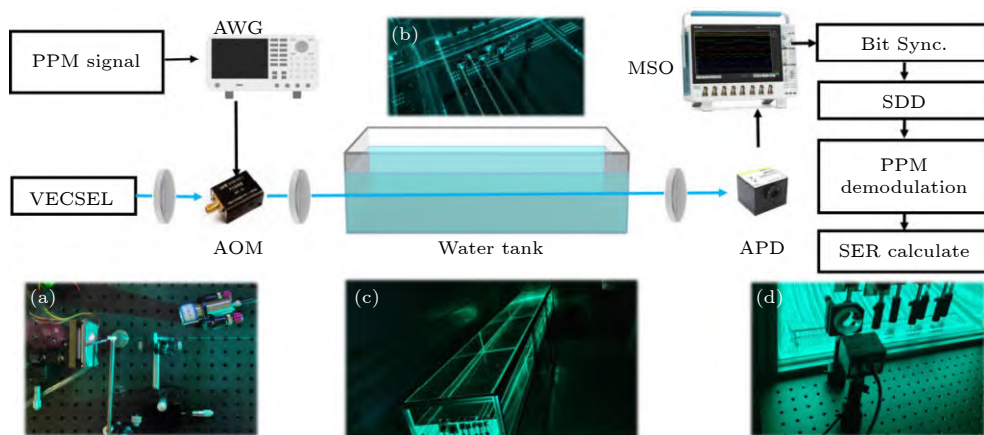


图 2 蓝光 VECSEL 的长距离 UWOC 系统示意图 (a) VECSELS 实物图; (b) 光路反射镜; (c) 水箱; (d) 接收装置

Fig. 2. Schematic diagram of the long-range UWOC system with blue VECSEL: (a) Physical diagram of VECSEL; (b) optical path reflector; (c) water tank; (d) receiver device.

长在 490 nm 附近, 同时测得其基频光波长在 980 nm 处, 这说明芯片外延结构设计无误, 外腔倍频后也可得到实验所需要的蓝光波段波长。

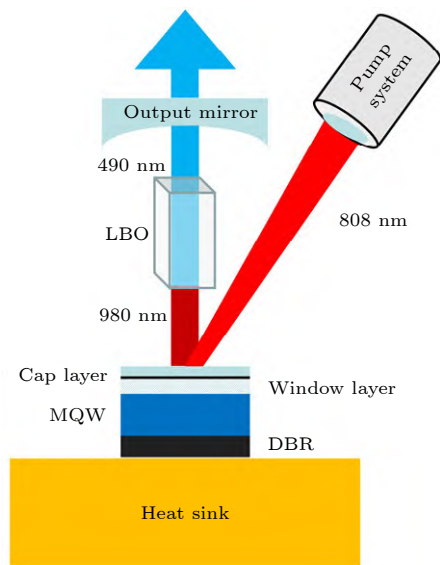


图 3 VECSEL 光源直腔结构图

Fig. 3. Structure of straight cavity of VECSEL.

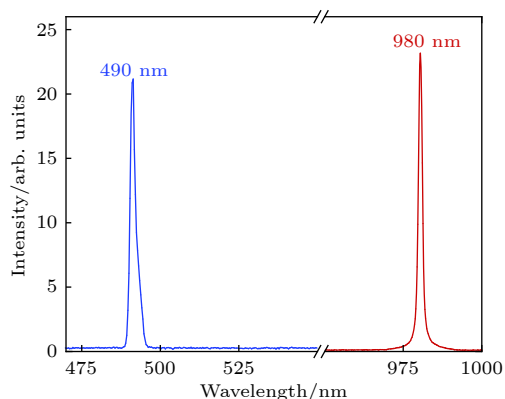


图 4 VECSEL 的基频光与倍频光光谱图

Fig. 4. Spectrogram of fundamental frequency light and frequency-doubled light of VECSEL.

之后对蓝光的输出功率进行了测量, 优化温控装置以用于确保 VECSEL 在不同温度下保持稳定的工作状态. 最终, 在温度 12 °C 时测量得出 VECSEL 的光-光转换效率接近 12.5%, 最高测量到的蓝光输出功率接近 5.05 W, 这个参数对于评估激光器的能力和性能是很重要的. 而在实验中, 考虑实验室水箱传输距离、探测器的灵敏度、激光器功耗以及热管理等因素. 最终选择了 100 mW 的激光功率, 这个功率足以实现所需的通信性能, 同时还能确保系统的稳定运行和寿命. 本文还对蓝光 VECSEL 的光束质量进行测量, 观察图 5 中插图可知, 在水

平方向和垂直方向上获得的 M^2 因子都是 1.08, 较低的 M^2 因子意味着 VECSEL 的光束质量也很好。

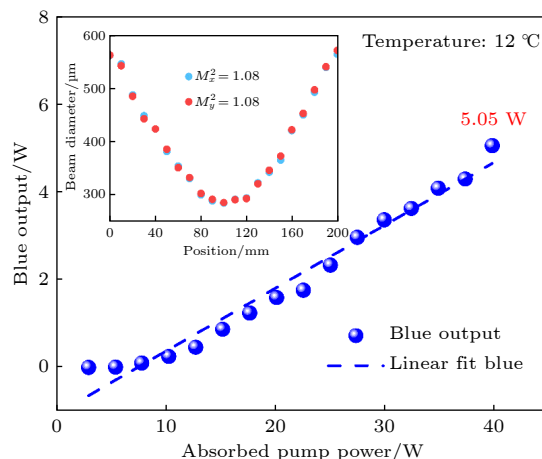


图 5 VECSEL 的 M^2 因子测量图及功率曲线

Fig. 5. M^2 factor measurement plot and power curve of VECSEL.

2.2 软判决原理

在 UWOC 系统链路中, 由于带宽资源相对充足, 不受严格的信道限制, 因此功率效率显著的 PPM 调制成为极具吸引力的选择. 与传统的 OOK 调制不同, OOK 常用的门限判决解调通过将接收到的信号与设定的阈值进行比较, 来确定传输的比特是 0 还是 1. 这种直接量化的方式会存在信号丢失误判的风险. 而 PPM 由于其独特的脉冲调制形式, 每个符号对应时隙中只有一个脉冲, 所以可以采用软判决解调器直接处理接收到的未进行量化的采样值, 这避免了信息丢失, 与硬判决相比, 软判决解调具有更好的性能. 软解码使用似然函数、欧几里得距离等指标, 其中欧几里得距离计算公式定义为

$$d_{\text{Euclidean}}(a, b) = \sqrt{(a_0 - b_0)^2 + (a_1 - b_1)^2 + \cdots + (a_{n-1} - b_{n-1})^2}, \quad (1)$$

式中, d 是用来衡量两个值相似或不相似的度量, 对应给定的所有可能出现的值 $a = (a_0, a_1, \cdots, a_{n-1})$ 和判决器接收的值 $b = (b_0, b_1, \cdots, b_{n-1})$, 通过 (1) 式计算两者的相似情况, 求出的欧几里得距离越小, 说明两者越接近.

在软判决解码中, 对于接收到的序列 r , 解码器会选择一个能使条件概率 $P(r)$ 最大化的值. 这

种解码称为最大似然估计解码 (MLD). 对于具有双面功率谱密度 $N_0/2$ 的 AWGN 信道, 条件概率 $P(r)$ 为

$$P(r) = \frac{1}{(\pi N_0)^{-n/2}} \exp \left\{ -\sum_{i=1}^n [r_i - s_i]^2 \right\}, \quad (2)$$

其中求和公式代表接收序列 r 与编码信号序列 s 之间的欧氏距离平方. n 是一个常数, 这样就可以简化 MLD 的计算. 软判决 PPM 解码即是将接收到的码字与所有可能的码字进行比较, 并选择给出最小欧几里得距离的码字, 简单来讲就是将“1”分配给采样值最大的时隙, 其余时隙均置“0”.

在图 6 中, 假设系统输入的 4 PPM 信号为“0100”, 在经过水下信道传输并受到衰减后, 接收器看到的是失真的波形. 由于湍流以及功率稳定性等因素的影响, 信号发射会有波动, 可能导致基线偏移. 如图 6(a) 所示, 尽管硬判决是一种简单的解调方法, 仅需根据阈值电压进行判定, 但这容易导致误判. 如图 6(b) 所示, 软判决在每个采样瞬间将连续 4 个时隙的采样值送入软判决器, 其中, 4 PPM 调制所有可能出现的调制值分别为 (0001, 0010, 0100, 1000), 通过采样值分别计算这四种情况对应的欧几里得距离, 其中 0100 对应的欧氏距离值最小, 故软判决器将脉冲信号的“1”赋值给最大值点“0.81”, 其他值都赋为“0”, 从而有效地避免了 PPM 调制中的擦除错误和误报错误. 符号内各个时隙的相对幅度大小对软判决至关重要, 因此软判决特别适用于像水下无线光通信这样信道失真较小的系统.

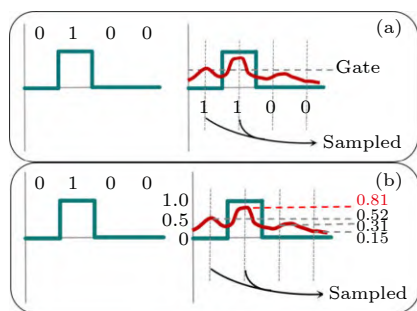


图 6 (a) 硬判决原理图; (b) 软判决原理图

Fig. 6. (a) Hard judgment schematic; (b) soft judgment schematic.

3 分析与讨论

在 UWOC 系统中, 除了调制方式等信号处理

手段, 接收光功率也是影响数据传输的关键因素之一, 而水作为 UWOC 系统信道的介质, 在决定光衰减程度方面起着特别重要的作用. 水下信道对光的衰减包括水的吸收和散射, 当光入射进水下信道后, 部分功率被水、叶绿素和腐殖质等物质吸收, 另一些功率被悬浮颗粒和溶解的盐分散. 比尔-朗伯定律将水下环境中的光衰减效应描述为

$$P_l = P_0 \cdot e^{-c \cdot l}, \quad (3)$$

其中 P_0 是进入水通道之前发射器侧的发射光功率; c 是衰减系数, l 是通道距离. 以 96 m 的 UWOC 信道为例, 通过测量不同距离的接收光功率值来计算光衰减系数. 如图 7 所示, 每隔 12 m 取一次测量值, 总共得到 8 个距离点. 为了减少测量误差, 使用一阶函数来拟合测量值. 根据拟合曲线, 结合 (3) 式, 可通过 48 和 96 m 距离上接收光功率求出衰减系数为 $c = 0.0591 \text{ m}^{-1}$, (4) 式为计算过程, 随后的实验就是基于这种自来水水质,

$$c = \frac{1}{96 - 48} \ln \frac{P_{48 \text{ m}}}{P_{96 \text{ m}}} \approx 0.0591 \text{ m}^{-1}. \quad (4)$$

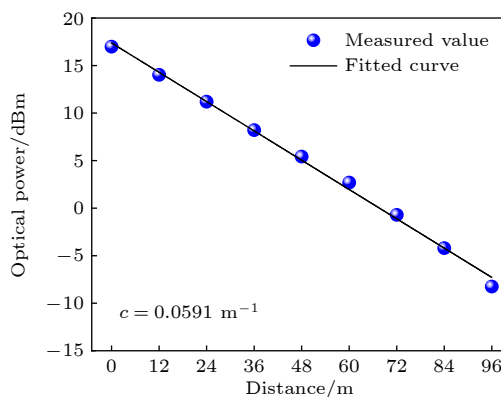


图 7 曲线拟合 96 m 处功率衰减系数

Fig. 7. Curve fitting power attenuation coefficient at 96 m.

在对光功率衰减情况进行测量后, 需要对硬判决及软判决进行验证. 在验证前, 首先进行了仿真来确定 PPM 调制的阶数. 使用 16, 64, 256 三种不同 PPM 调制阶数在高斯信道下进行误码率的对比. 如图 8 所示, 随着 PPM 的调制阶数的增加, 系统在相同信噪比下的误码率会降低, 但占用带宽更大, 导致速率降低. 本文综合考虑传输速率和误码率, 在实验中选用了 64 PPM 作为调制方案.

确定调制方案后, 为了评估伪随机序列在 PPM 方式下采用不同判决方式的传输性能, 通过调整信噪比进行了仿真验证, 结果如图 9 所

示. 仿真采用高斯信道模型, 设置基带传输速率为 20 MHz, PPM 调制阶数为 64 PPM, 信噪比范围从 -10 到 0, 分别对传输信号采用了硬判决和软判决解调, 并计算得出解调后的误码率. 结果表明, 在信噪比较低时, 软判决解调相较于硬判决解调拥有显著的性能优势.

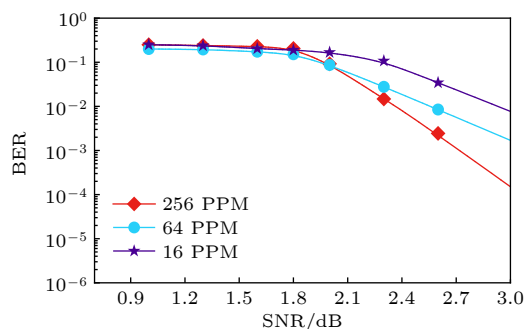


图 8 不同调制阶数的误码率仿真

Fig. 8. BER simulation of different modulation orders.

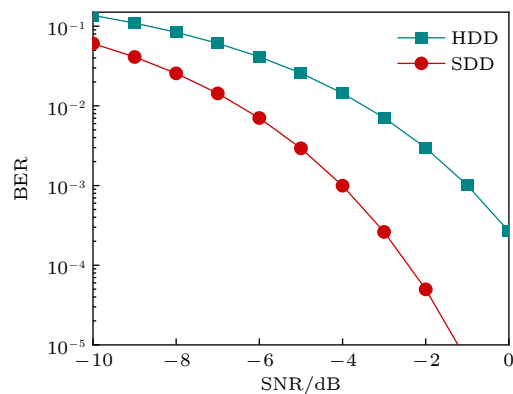


图 9 硬判决与软判决误码率仿真

Fig. 9. BER simulation of hard and soft decision.

根据对软、硬判决的仿真参数, 随后在装满清水的水槽中进行了验证测试. 分别对接收端的光电探测器收集到的信号进行了硬判决和软判决两种解调处理. 最终采用不同判决解调的结果如图 10 所示, 可以清晰地观察到, 在对相同数据集进行解调时, 采用软判决技术得到的数据误码率始终低于硬判决技术, 这一发现与之前的初步分析吻合.

软判决解调通过赋予最高采样值权重的策略, 有效地避免了因噪声干扰或功率波动导致的信号尖峰错误识别问题, 从而显著地降低了误码率. 尤其在功率较低、信道条件不理想的情况下, 硬判决解调的性能明显不及软判决解调. 与仿真不同的是, 随着信号功率的提升和光子数量的增加, 两者在误码性能上的差距逐渐缩小. 这表明, 在低信噪

比的环境中, 软判决解调具有更明显的优势. 而在高信噪比环境中, 硬判决解调也可以作为一种可选方式. 对比硬判决和软判决解调的误码率, 结果显示, 在弱光条件下, 采用软判决解调相较于硬判决解调在性能增益上有着大约 2 dB 的提升. 这一数据强调了软判决解调在提高通信系统性能方面的有效性.

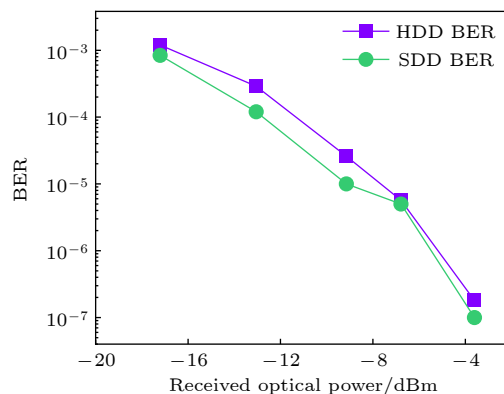


图 10 基于 64 PPM 的硬判决与软判决实验误码率比较

Fig. 10. BER plot of 64 PPM based hard and soft judgment experiments.

之后采用软判决算法改进系统, 通过调整 PPM 信号速率, 研究了 64 PPM 在不同带宽下的通信性能. 采用衰减片衰减接收光功率, 同时对不同接收光功率下的信号进行记录, 根据示波器记录的波形, 绘制出不同频率下的 PPM 信号误码率图, 图 11 表示了 64 PPM 在时隙频率分别为 10, 20, 50 和 100 MHz 时的误码率情况:

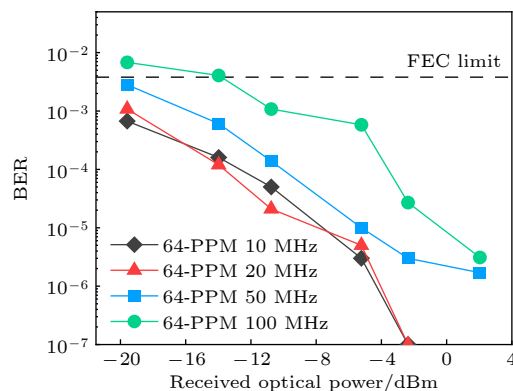


图 11 64 PPM 在不同带宽频率下的误码率与接收光功率的关系

Fig. 11. BER of 64 PPM at different bandwidth frequencies.

信号在 10 与 20 MHz 速率下误码率非常接近, 这说明两者的调制深度类似, 而 50 与 100 MHz

误码率展现出了明显的增加,这是由于信号调制深度减弱,信号信噪比下降.实验测量到了最低-20 dBm左右的接收光功率,最终选择 50 MHz 作为实验速率,这是因为尽管相比低速率误码率有所升高,但这时 PPM 的误码率还没有接近前向纠错编码极限.这意味着采用软判决算法优化的 PPM 调制能够极大地延长 VECSEL UWOC 系统的传输距离.在实际测量中,由于清水衰减系数较小,尽管光信号通过了 96 m 的传输距离,但到达接收器的光功率依然有-7.6 dBm,此时我们测得误码率为 1.9×10^{-5} .根据 PPM 调制原理,此时对应的数据传输速率为 4.69 Mb/s.这表明基于软判决 PPM 调制的 VECSEL 水下光通信系统通信性能表现出色.

4 结 论

本文设计了一种基于 VECSEL 的 UWOC 系统,阐述了 VECSEL 的基本工作原理与特点.然后,结合软判决算法优化了 PPM 调制,增加系统抗干扰能力,系统也拥有优异的通信性能.在自来水信道下,测试蓝光通过不同传输距离后的功率变化情况,得到该光束在自来水信道的衰减系数为 0.0591 m^{-1} .基于这套 UWOC 系统进行了水下通信性能的测试,实现了在 96 m 距离下,最大 50 MHz 的传输信号时隙频率,并测得对应的误码率为 1.9×10^{-5} .PPM 调制与 VECSEL 光源的结合,也为水下光通信系统提供了一种高效且可靠的解决方案.

参考文献

- [1] Heidemann J, Stojanovic M, Zorzi M 2012 *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **370** 158
- [2] Tian P, Liu X, Yi S, Huang Y, Zhang S, Zhou X, Hu L, Zheng L, Liu R 2017 *Opt. Express* **25** 1193
- [3] Kaushal H, Kaddoum G 2016 *IEEE Access* **4** 1518
- [4] Saeed N, Celik A, Al-Naffouri T Y, Alouini M S 2019 *Ad Hoc Networks* **94** 101935
- [5] Mobley C D, Gentili B, Gordon H R, Jin Z, Kattawar G W, Morel A, Reinersman P, Stamnes K, Stavn R H 1993 *Appl. Opt.* **32** 7484
- [6] Bricaud A, Babin M, Morel A, Claustre H 1995 *J. Geophys. Res. Oceans* **100** 13321
- [7] Li J, Luo J H, Yuan X H 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0706005 (in Chinese) [李军, 罗江华, 元秀华 2021 *光学学报* **41** 0706005]
- [8] Wang B P, Yu J, Wang Y Z, Meng J J, Mo Ze Qiang, Wang J D, Dai S J, He J G, Wang X D 2020 *Laser Optoelectron. P.* **57** 230604 (in Chinese) [王宝鹏, 余锦, 王云哲, 孟晶晶, 翁泽强, 王金舵, 代守军, 何建国, 王晓东 2020 *激光与光电子学进展* **57** 230604]
- [9] Wu Z Y, Liu X Y, Wang J S, Wang J 2018 *Opt. Lett.* **43** 4570
- [10] Ghassemloooy Z, Popoola W, Rajbhandari S 2019 *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with Matlab®* (Boca Raton: CRC Press)
- [11] Fei C, Wang Y, Du J, Chen R, Lv N, Zhang G, Tian J, Hong X, He S 2022 *Opt. Express* **30** 2326
- [12] Qi Z, Wang L, Liu P, Bai M, Yu G, Wang Y 2023 *Opt. Express* **31** 9330
- [13] Wang J, Lu C, Li S, Xu Z 2019 *Opt. Express* **27** 12171
- [14] Huang A, Yin H X, Ji X Y, Liang Y J, Wen H, Wang J Y, Shen Z W 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0606002 (in Chinese) [黄安, 殷洪玺, 季秀阳, 梁彦军, 文浩, 王建英, 沈众卫 2024 *光学学报* **44** 0606002]
- [15] Shen J, Wang J, Yu C, Chen X, Wu J, Zhao M, Qu F, Xu Z, Han J, Xu J 2019 *Opt. Commun.* **438** 78
- [16] Yan Q R, Wang M, Dai W H, Wang Y H 2021 *Opt. Commun.* **495** 127024
- [17] Han X T, Li P, Li G Y, Chang C, Jia S W, Xie Z, Liao P X, Nie W C, Xie X P 2023 *Photonics* **10** 451
- [18] Bossert M, Schulz R, Bitzer S 2022 *IEEE Trans. Inf. Theory* **68** 7107
- [19] Zhang C, Zhang Y, Tong Z, Zou H, Zhang H, Zhang Z, Lin G, Xu J 2022 *Opt. Express* **30** 38663
- [20] Hu S, Mi L, Zhou T, Chen W 2018 *Opt. Express* **26** 21685
- [21] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 383001
- [22] Rahimi-Iman A 2016 *J. Opt.* **18** 093003
- [23] Rudin B, Rutz A, Hoffmann M, Maas D J, Bellancourt A R, Gini E, Stüdmeyer T, Keller U 2008 *Opt. Lett.* **33** 2719
- [24] Heinen B, Wang T L, Sparenberg M, Weber A, Kunert B, Hader J, Koch S W, Moloney J V, Koch M, Stolz W 2012 *Electron. Lett.* **48** 11
- [25] Yan R, Zhu R, Wu Y, Wang T, Jiang L, Lu H, Song Y, Zhang P 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 011106

Long-range underwater wireless optical communication system based on 490 nm vertical-external-cavity surface-emitting laser^{*}

Wang Tao¹⁾ Wang Zhang-Xing¹⁾ Shen Xiao-Yu¹⁾ Zhu Ren-Jiang¹⁾
 Jiang Li-Dan¹⁾ Lu Huan-Yu²⁾ Lu Yong-Le³⁾
 Song Yan-Rong⁴⁾ Zhang Peng^{5)†}

1) (College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

2) (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

3) (Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

4) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

5) (National Center for Applied Mathematics in Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

(Received 21 June 2024; revised manuscript received 31 July 2024)

Abstract

The exploration and utilization of marine resources has promoted the rapid development of marine science and technology, and has put forward higher requirements for underwater communication technology. Long distance underwater wireless optical communication (UWOC) requires the selection of light source on the transmitter side. Laser diodes (LDs) have excellent portability and maneuverability, and have been widely used in the UWOC systems. However, their beam quality is not so good and it is difficult to modulate under high power. In recent years, vertical-external-cavity surface-emitting laser (VECSEL) has received much attention due to its high output power and good beam quality. This work is to explore the advantages of using a 490-nm blue VECSEL as a light source in UWOC, and to improve the performance of the UWOC system by the soft-decision pulse-position modulation (PPM). First, the optical power attenuation coefficient of the channel is obtained, and the measured c is about 0.0591 m^{-1} in a 96-m-long tap channel. Subsequently, soft-decision and hard-decision are simulated and experimentally verified. Both simulations and measurements show that the bit error rate (BER) can be significantly reduced with soft-decision. Afterwards, we improve the system by using the soft-decision algorithm and investigate the communication performance of 64 PPMs at different bandwidths by adjusting the PPM signal rate. Finally, 50 MHz is chosen as a signal rate in the experiment. Then a UWOC system is demonstrated in this work. The transmitter side consists of a 490-nm VECSEL light source with an acousto-optic modulator (AOM). The pseudo-random binary sequence (PRBS) is loaded into the arbitrary waveform generator (AWG) for digital-to-analog conversion after PPM modulation, and the analog signal is sent to the driver of the AOM for acousto-optic modulation of the incident beam. The laser is focused before

* Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant No. CSTB2024NSCQ-MSX0833), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975003, 61790584, 62025506), the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant Nos. KJQN202200557, KJQN202300525), the Cooperation Project between Chongqing Local Universities and Institutions of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. HZ2021007), and the Chongqing Normal University Foundation (Talent Introduction/Doctoral Program), China (Grant No. 23XLB003).

† Corresponding author. E-mail: zhangpeng2010@cqu.edu.cn

entering the AOM and then collimated after having exited to reduce its divergence. The modulated laser beam passes through a distance of 96 m in the tank by using multiple mirrors on both sides of the tank. Then, the beam is focused by a lens to the avalanche photodiode (APD) for photoelectric conversion in the end, and the signal is processed by a mixed signal oscilloscope (MSO) after data acquisition. A soft-decision algorithm is introduced to further optimize the performance of the PPM modulation. When the optical signal passes through a relatively long distance of 96 m, the measured BER is as low as 1.9×10^{-5} . This indicates that the soft-decision PPM-based 490 nm blue VECSEL UWOC system performs very well.

Keywords: vertical external-cavity surface-emitting lasers, pulse-position modulation, soft decision algorithms, underwater wireless optical communications

PACS: 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b

DOI: [10.7498/aps.73.20240860](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240860)