

激光诱导声波的跳时隙水下数据传输方法

廖欣^{1,2*}, 蒋红艳^{1,2}, 何宁^{1,2**}

¹桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

²广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 针对跨介质无线通信信道的约束影响,依据大气与海洋环境通信特点,提出一种利用激光诱导声波实现跨介质的跳时隙脉冲位置调制(PPM)水下通信的信号传输方法。研究光声效应机理,分析激光光源在水下的时频特性,采用无线光通信与水声通信技术的融合机制,合理选择跳时隙类型组合编码调制,有效提高信息传输可靠性及安全性。基于脉冲激光光源建立空中到水下的跳时隙 PPM 通信链路,通过现场可编程门阵列(FPGA)完成编解码,实现了字节组帧的信息传输测试。实验测试结果证明:以脉冲激光作用水介质激发的声波通信,可进行远程指定水域的激光致声控制,将光视距通信转换为水下任意位置目标通信,大大提高了通信作业的灵活性和主动性,可用于空中到水下的跨介质通信。

关键词 激光光学;光声效应;激光诱导声波;跳时隙;字节组帧;导频码

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1806002

1 引言

随着国家对国土安全特别是海洋安全越来越重视,空天地海通信将发挥重要作用。如何在复杂海洋环境中实现信息可靠传输和保密安全,是跨空水介质对潜通信亟需解决的问题。采用机载、星载和舰载的蓝绿激光直接实现对水下目标的通信,可以充分发挥激光技术和空中平台两者的优势,这种灵活和隐蔽的跨介质通信技术受到世界各国专家学者的广泛关注,并得到快速发展。开展跨空水介质通信技术研究有助于海洋通信的发展应用^[1]。激光声通信是光学与声学交叉领域。激光可远程激发声波,因而瞬时光声源的作用位置易受控制,且光声效应产生信号的宽频带具有高的分辨能力和水下传播时的抗干扰能力。因此,激光声的脉冲特性在水下目标探测、通信和特征模拟等领域有着广阔的应用前景。

近年来,在激光声的形成机理与特性方面的理论计算研究很多,而对激光声的传输特性和频谱成分的实验应用研究较少。激光致声作为一种新型产生声波的方式是以高功率的激光脉冲从空中入射到水面,水介质在极短的时间内吸收激光能量而通过热膨胀或击穿机制激发声波^[2-4]。从 20 世纪 60 年代中期开始,激光与液体相互作用激发声波的机理逐渐成形,研究人员将光声转换机制进行分类,以便解释各种实验数据^[5]。20 世纪 70 年代初,美国的 Shooter 等^[6-7]

在湖里进行了实验,获得了激光声信号的幅度、频谱和空间特征。在激光致声空-海通信应用方面,2004 年 Sergey 等^[8]利用高强度光脉冲来实现对水下深海设备的远程控制,水下产生的声波可以将脉冲-位置调制技术应用于实际的数字通信系统。美国海军研究实验室的研究团队在 Glendora Lake 水声实验场利用激光致声实现了 190 m 通信距离系统的初步测试^[9]。Antonelli 等^[10-11]对激光声信号应用于水下通信开展了深入的研究,包括激光声信号的产生机理、时频特性和调制特性等,指出激光脉冲重复频率可以控制激光声频谱产生类似于噪声的多进制频移键控(FSK)信号,降低了信号的截获率,为跳频扩频技术的应用提供了理论依据,并首次提出采用激光激发声波技术和干涉仪法实现水下与空中双向通信的设想。Yellaiah 等^[12]分析了激光脉冲持续时间对激光诱导的声波特性的影响,在保持其他实验条件不变的情况下,改变激光器脉冲宽度和输入能量,开展了声波的时域和频域特性研究实验,结果表明:相比皮秒级的激光击穿而言,纳秒级激光击穿由于可以激发较强的传输和反射声脉冲而更加实用。哈尔滨工程大学研制了一套水下目标探测的激光声技术实验系统,不仅完成在实验室的实验,还参加了海上实验,通过准确检测水下目标的回波实现目标的探测^[13]。海军工程大学的王晓宇等^[14]利用高速摄像机对激光击穿水介质过程中的冲击波辐射、空泡脉动等现象进行了记录,并分析了水下光击穿的能

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2021-12-30; 录用日期: 2022-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(61961008)、广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金(GXKL06200127)

通信作者: *gtlx@163.com; **eicnhe@guet.edu.cn

量分布,研究了激光声在液体中的传输特性。

对比海洋环境下的电磁波、蓝绿激光和水下声波三种通信方式,利用激光诱导的声波信号具有覆盖的水域广阔、致声设备与水隔离、可机动灵活实现远程控制等特点,通过由光波到声波的信号类型转换和脉冲编码调制处理,有利于降低信道链路干扰带来的约束和影响,实现由空中平台到水下目标的指令和信息传送等作业,充分发挥了光波和声波各自的优势。

由于跨介质无线通信环境的复杂性和随机性,海洋信道散射引起的多径效应将给信息的稳定传输带来诸多不确定因素^[15]。目前海洋通信研究分为大气和水下两层,通信机制相互独立。受海洋信道的约束,仅靠单一技术难以保证复杂环境下的空中与水下通信任务。需要寻找适合海洋通信的新机制,真正实现多种技术的融合,但目前在这方面的技术研究工作和文献报道相对较少。无线环境下通信易受截获攻击,一般都采用跳频、扩频、跳频加调制跳变技术来降低风险。为探索适合大气到水下的通信信号传输机制,本文提出一种激光致声的跳时隙水下数据传输方法,运用传统脉冲位置调制(PPM)技术通过不同导频码与时隙类型的组合,以字节组帧的时隙跳变通信方式来增强空中到水下通信系统的环境应用能力。

2 脉冲激光声激励

激光作用于液体可激发声波信号。激光特性、液体特性、激光入射到水面的角度和激发机制都与激发声波性能有密切关系。当激光能量密度超过液体的击穿阈值时,在聚焦区域内将发生光学击穿、空化脉动等一系列分子(粒子)运动,从而产生等离子体膨胀声信号和空泡溃灭声信号,这些声信号统称为激光声信号^[16]。当激光与水介质发生相互作用时,光波能量迅速转化为声压能量,其能级大小与激光到达水面的脉冲能量有密切关系。光击穿机制下激励的激光声源属于脉动球源,在近距离(厘米级)以冲击波的形式存在,辐射的激光声信号近似球形波阵面,能量在波阵面上分布为均匀球面波信号。脉动球面波信号如图 1 所示。

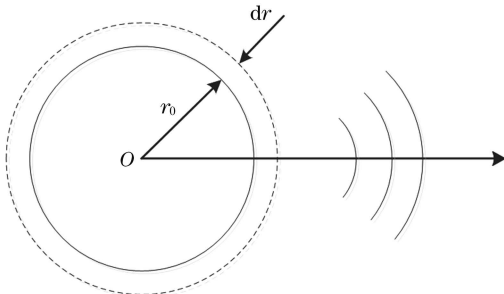


图 1 脉动球面波辐射声信号示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulsated spherical source radiating acoustic signal

设在 t_0 时刻,激光声源的半径为 r_0 ,而在 $t_0 + dt$ 时刻其半径是 $r_0 + dr$ 。由于半径增加导致其体积发

生了变化,进而导致周围液体的径向波动,形成激光声信号。

脉动球面波辐射声源信号的声压方程可表示为^[17]

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} + \frac{B}{r} e^{j(\omega t + kr)}, \quad (1)$$

式中: A 、 B 均为常数。

由激励机理可知,球面波是向外径向辐射源,而不是会聚声源。由此可知 $B = 0$ 。因此激光声信号的声压能量方程式可写为

$$p = \frac{A_a}{r} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (2)$$

式中: A_a 是辐射声脉冲信号的原始幅度; r 是信号接收位置到激光声声源中心的距离; $k = \omega/c$ 为波数, c 为水下声速, ω 为角频率。

可以看出,激光声脉冲信号幅度随距离 r 的增加而减小。

3 跳时隙 PPM 原理与帧结构

PPM 是一种正交调制方式,相比传统开关键控(OOK)调制方式而言,具有能量利用率和传输效率高的优点,可有效降低发射能量要求。PPM 将一组 n bit 二进制数据映射到 $2n$ 个时隙内一个对应时隙上的单个脉冲信号^[18]。

设定 n bit 的数据 $M(m_1, m_2, m_3, \dots, m_n)$, 则与脉冲位置 L 的映射关系记为

$$L = m_1 + 2m_2 + \dots + 2^{n-1}m_n. \quad (3)$$

设 S_n 为调制信号, P_c 为光脉冲功率,时隙宽度为 T_c , t 为时域位置,则有

$$S_n(t) = \begin{cases} P_c, & LT_c < t < (L+1)T_c \\ 0, & \text{其他位置} \end{cases}. \quad (4)$$

对一个 2 bit 的二进制数进行 PPM,在时域上调制的时隙数为 $2^2 = 4$,由式(3)可得到 L 对应于相应脉冲位置的映射关系,能满足编码调制的唯一性。

PPM 信号的同步是实现数据解调的关键,通过时隙同步和符号同步来保证接收端正确识别,且符号同步建立在时隙同步的基础之上。为便于接收信息帧起始位置识别,数据传输中一般在一帧数据的前端加入同步脉冲,以便接收方判断信号接收的开始。图 2 所示为由一定宽度的引导信号和数据脉冲组成的帧结构。

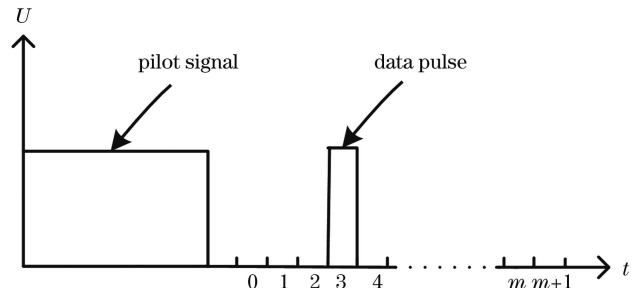


图 2 具有引导信号和数据脉冲的帧结构

Fig. 2 Frame consisting of pilot signal and data pulses

依据实际通信需求可以用单字节或多字节组成一帧数据,然后通过随机分配每一帧冠以不同 PPM 调制类型,并在同一时间轴上进行组合编码,即可实现跳时隙信号传输。在串行的数据中,对于通信系统中最常用的 8 bit 数据而言,常用的脉冲位置调制方式有 256PPM、16PPM 和 4PPM 三种类型。通过对每帧所采用的脉冲时隙类型进行变换,可增加信号结构的复杂程度,提高第三方解码信息的难度。

图 3 所示为具有两个同步导频脉冲,在同一时间轴下采用三种时隙类型调制方式组合的数据字节组帧结构示意图。

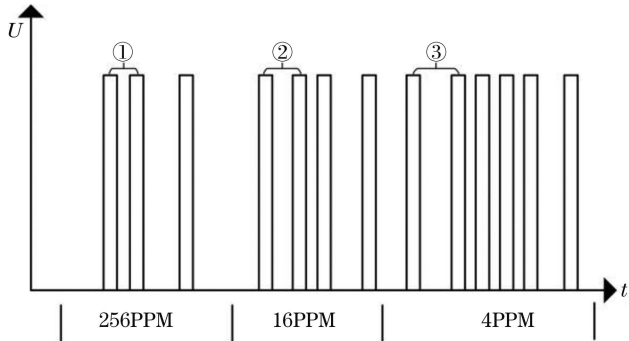


图 3 三种不同时隙类型组合的调制信号帧结构

Fig. 3 Combined PPM frame structure with three different time slots

图 3 中 ①、②、③ 分别表示三种时隙类型的导频码。由图 3 可知,采用双脉冲导频组帧,每种时隙类型的引导脉冲间隔可设置为不同时间,用于区分当前传

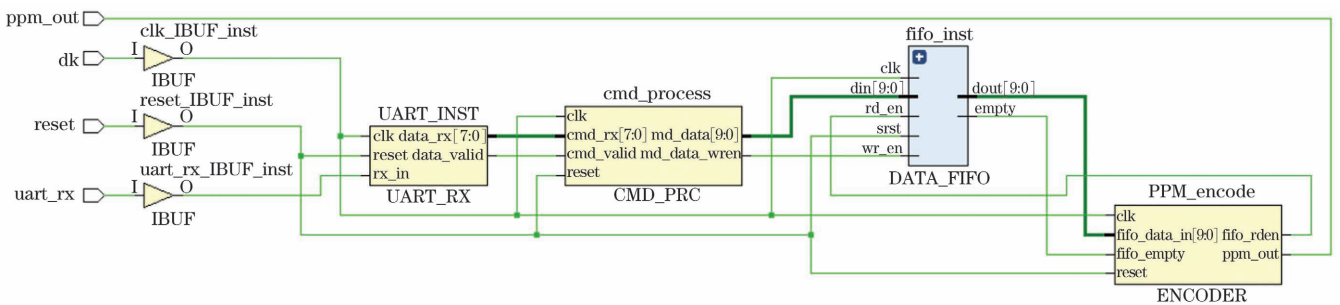
输的 PPM 信号的时隙类型,不同时隙类型导频码与数据脉冲有对应关系。

4 FPGA 编解码实现

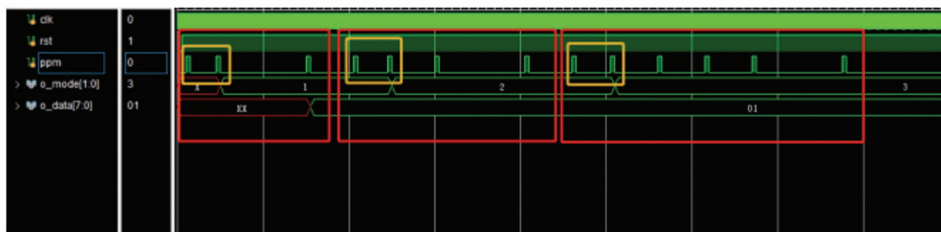
若系统数据信息采用现场可编程门阵列(FPGA)以 256PPM、16PPM 和 4PPM 三种调制类型按字节组帧进行编码,系统编码的时隙类型与导频码间隔关系设定如下:导频码间隔 t_1 对应 256PPM;导频码间隔 t_2 对应 16PPM;导频码间隔 t_3 对应 4PPM。

为保证编码调制的时隙类型呈现随机性,选择利用 FPGA 定时器数据,在发送时刻读取定时器的数据对 3 求余数,根据得到的余数采用上面三种时隙类型完成字节循环组帧编码,然后用组合的串行输出数据帧脉冲驱动激光器。

本系统接收端 FPGA 利用脉冲上升沿作为触发信号,其功能是提取时隙同步信号和帧同步信号,当接收到脉冲上升沿时启动短周期脉冲开始计数,待接收到第二个脉冲时停止计数,然后读取计数器数值并将计数器清零,同时进行间隔判断。已知时隙宽度为 T_c ,相邻脉冲时间间隔为 ΔT ,通过 $(\Delta T - T_c)/T_c$ 计算出两脉冲间的导频码间隔为 $t_1、t_2、t_3$ 时,即判定为不同时隙类型帧开始,否则判定为对应每一帧信息脉冲的时隙位置。依据各时隙类型的字节组帧规则,实现对每帧数据信息的解码还原,同时进入下一轮询时隙类型字节帧数据脉冲接收。图 4 给出系统 FPGA 发送编码的寄存器传输级(RTL)仿真实现。



(a)



(b)

图 4 FPGA 编码实现。(a)RTL 模型;(b)仿真编码波形

Fig. 4 Implementation of FPGA encoding. (a) RTL model; (b) simulated waveform for encoding

图 4(a)中各模块功能如下:串口模块(UART-RX)由 rx_in 接收上位机数据,通过对数据流解析后从 data_rx 输出;串口命令解析模块(CMD-PRC)接收串口数据并解析串口数据命令帧,根据串口帧结构命

令将一个 8 bit 的待发送数据与 2 bit 的发送模式进行拼接,得到一个 10 bit 数据,送 md_data 输出,并写入 fifo 进行数据和工作模式的缓冲处理;数据缓冲模块(DATA-FIFO)用于匹配速率,可一次写入多条数据

后再进行连续的字节帧数据发送,缓冲信号由 dout 端输出;编码模块(ENCODER)完成跳时隙编码输出,将前面处理的编码(10 bit)转换为由两个引导脉冲的帧头和对应的数据脉冲构成的时隙字节帧结构,最后的串行时隙编码信号由 FPGA 的输出引脚 ppm_out 送驱动电路控制激光器。图 4(b)的仿真编码波形帧结构与图 3 相似。发送端 FPGA 的各模块信号编理由时钟协调控制,实际接收时是将经水听器采集处理后的跳时隙信号由 FPGA 解码为能送上位机识别的数据信号,进而完成接收字符译码显示。

5 实验测试与结果分析

5.1 实验系统

系统使用的大功率脉冲激光器波长为 1064 nm,最高重复频率 50 Hz,输出最大脉冲能量 300 mJ,脉宽 <10 ns,激光器由外部 TTL 电平触发驱动。水听器响应频率 0.02~200 kHz,接收灵敏度优于 (-208.5 ± 2.5) dB。FPGA 采用 Altera 的 Cyclone II 系列

EP2C8Q208C8。发射端 FPGA 输出的编码信号控制激光到水中产生激光声,由水听器捕获激光声信号,经放大、整形、恢复处理送入 FPGA 进行解码还原,送上位机进行数据监测。实验系统组成如图 5 所示。

图 5 中由光驱动模块输出编码信号控制激光器,按照设计的 PPM 跳时隙数据信号发射脉冲光,根据水介质特征和空中到水面的环境,利用光学系统可控到达水下的激光光斑大小和聚焦状态,获得所需的激光声信号。实验测试在 0.7 m 深的水中进行,通过控制脉冲激光输出到水下 150 mm 处会聚,水听器可在距激光脉冲声源约为 1300 mm 的水中上下移动。若在更宽的水域或实际水域中,根据应用环境条件需求,可通过增加激光器脉冲能量提高声能级转换效率来扩大传输距离。

5.2 衰减特性

产生的激光声强度会受到激光能量密度的影响。图 6 为水听器采集处理的单脉冲信号时频信号波形^[19-20],其中图 6(a)为时域波形,图 6(b)为频域波形。

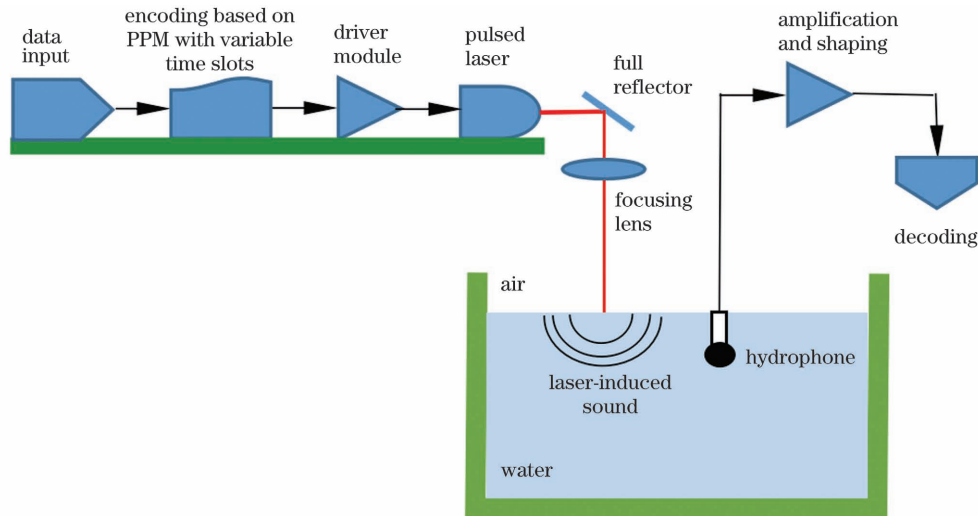


图 5 实验系统组成框图

Fig. 5 Block diagram of experimental system

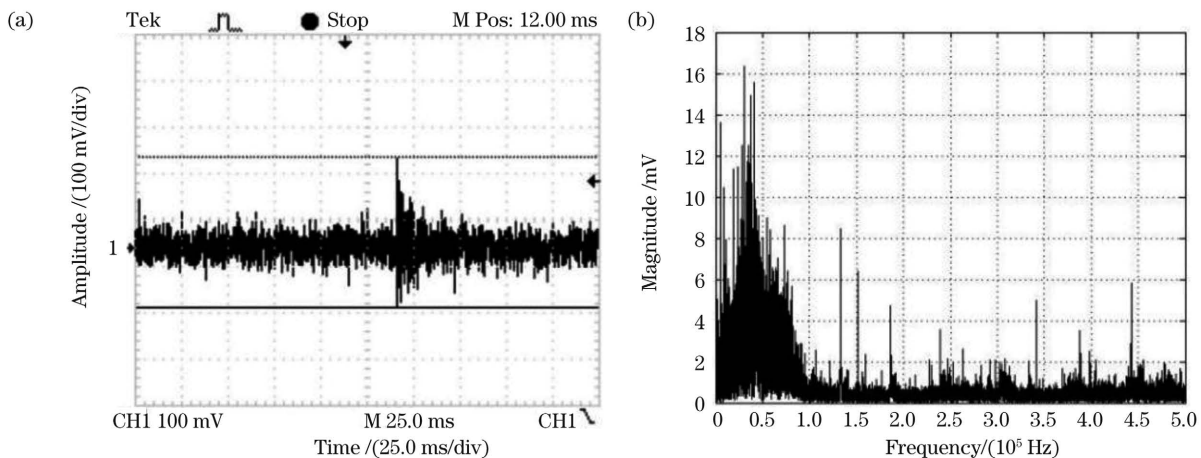


图 6 单个激光声脉冲信号的时频波形。(a) 时域波形;(b) 频域波形

Fig. 6 Time- and frequency-domain waveforms of single laser-induced sound pulse. (a) Time-domain waveform; (b) frequency-domain waveform

由图 6 可知,水听器接收到的激光声信号在时域上呈现为多个峰值的瞬时带区,形成的声波信号在幅度上呈现出逐渐衰减直至消失的趋势,激光脉冲能量高则激光声带区变窄且幅度增加;通过傅里叶变换后得到激光声信号峰值频率大约为 30 kHz,大于 100 kHz 的频谱分量迅速衰减,主要表现为随机噪声形式。在没有激光作用时,系统接收的噪声呈现为宽带高斯白噪声,当收到激光超声信号时其频谱能量分

布主要在低频部分,图 6(b)中 100 kHz 以上的噪声出现不规则且具有一定幅度的干扰峰。除系统电路工作的热噪声外,还有外界仪器启动、电机运转、楼面振动等机械波的随机影响都会传导到水槽引起干扰,但幅度远小于激光产生的声波信号,通过设计相关电路可进行分离处理。

5.3 系统测试平台与传输接收时隙波形

系统测试平台如图 7 所示。

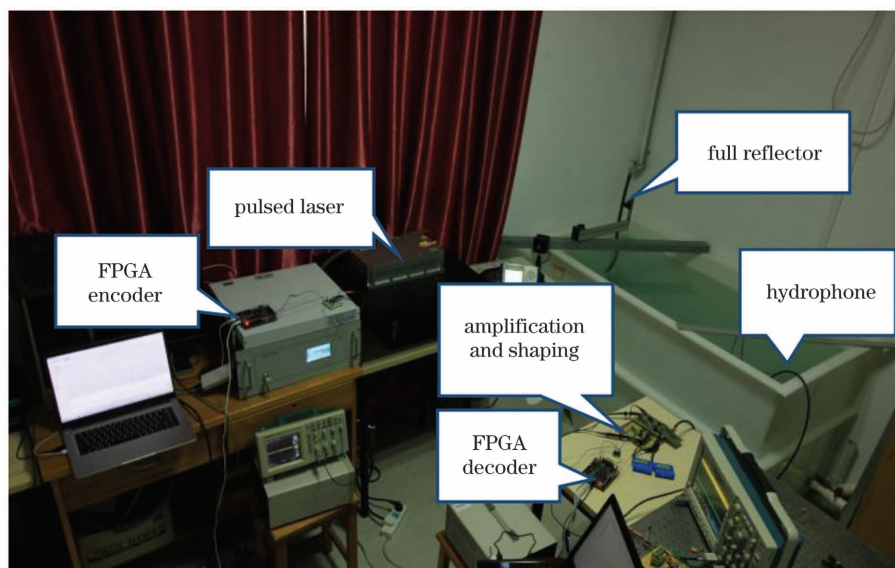


图 7 系统测试平台

Fig. 7 System testing platform

图 7 中标注了系统主要部件,激光器输出脉冲能量为 60 mJ,经空间传输到达水面的脉冲能量达到 15 mJ 时完成激光致声传输。为了便于观测对比,实验采用调制阶数为 8、4、2 的三种 PPM 类型进行编码组帧测试,探讨高调制阶数(长周期)和低调制阶数(短周期)对应帧长的变化与传输速率关系,发射端编码时设定一个时隙脉冲宽度为 10 ms,由于水下信道对信号传输存在展宽效应,编码时还必须考虑一帧中每个脉冲加入一定长度的保护时隙。实验用水池为静水状态,噪声干扰较小且相对稳定,通过发射“J10”字符控制激光输出,传输速率为 8 bit/s,系统采用泰克 DPO4054 示波器捕获到水听器接收处理的三帧脉冲波形如图 8 所示。当到达水面的激光能量为 25 mJ 时,多次重复传输测试表明接收误码率可优于 10^{-5} 。

图 8 中从左到右的串行 PPM 时隙波形表示每一个字符采用双脉冲引导组成一帧,依据不同时隙类型完成对应数据信号恢复。图 8 所示波形上半部分为水听器采集后放大处理的模拟声频信号,下半部分为经放大整形处理后的波形,两部分信号响应位置是对应的,可直接送 FPGA 进行译码处理。由于受水下无线传输时信道因素影响,随机干扰噪声也会经水听器接收进入后端电路,因此在水声信号接收放大整形电路设计时主要考虑水听器与前置放大器的阻抗匹配和放

大器间的信号耦合匹配,信号放大部分选择高阻输入运放构成一级前置放大和两级主放大电路,整形部分采用 CMOS 门芯片组成一级整形和一级低通滤波电路完成信号处理。不同调制类型的 PPM 信号帧长不同,由时域波形可知调制阶数为 8 的一帧周期明显大于调制阶数为 4 和 2 的。依据调制阶数大小与传输速率的反比关系,时隙类型跳变组合应根据实际应用需求来选择调制阶数类型进行编码,以保证通信双方在开放信道下实现安全可靠的数据传输。若在满足激光器脉冲宽度响应条件下,当设置每个时隙脉冲宽度为 $10 \mu\text{s}$ 时,系统传输速率可优于 5 kbit/s,表明传输速率随着时隙脉冲宽度的减小有一定的提升空间。系统传输速率主要受激光器的脉冲重复频率限制,重复频率高则脉冲能量下降,跨介质无线光通信的脉冲能量决定光在水下的穿透能力,而在激光致声通信中光声转换效率取决于激光脉冲能量,因此,在实际通信应用中应综合考虑。

传统 PPM 通信以固定参数特征实现传输,这为非合作接收方的信号检测和参数截获提供了突破口。新系统采用变参数的时隙类型组合编码和短帧处理技术,不但可以提升信息的抗截获优势,还能减少传输带来的时延积累,提高信息位置判断准确性和识别效率。

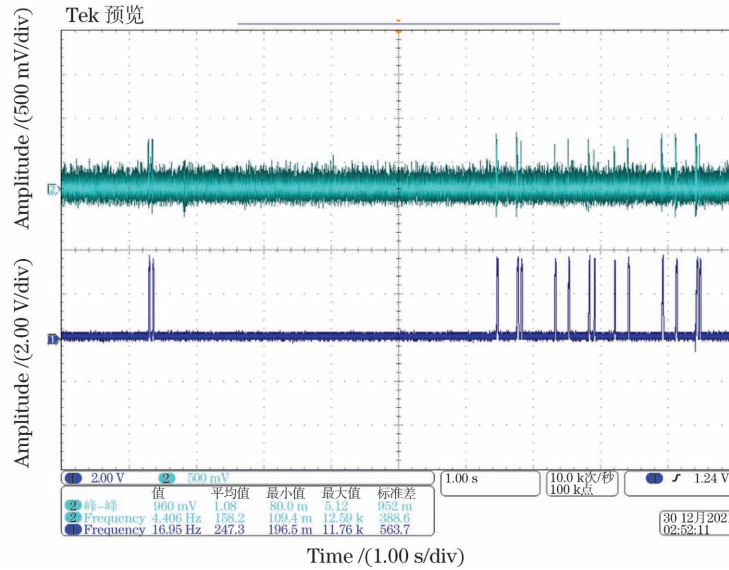


图 8 “J10”对应的三帧接收波形

Fig. 8 Received waveform for corresponding three frames of “J10”

6 结 论

本文阐述了跨介质激光致声水下通信中的信道特点。针对开放信道环境下信号传输的风险,提出一种光与声通信技术融合的跳时隙的通信机制。分析了跳时隙 PPM 的时域帧结构和 FPGA 编解码实现过程,采用导频码与不同时隙类型组合编码实现字节组帧的跳时隙字符信息传输。通过脉冲激光进行水下激光声激励,完成了激光声信号时频特性和数据信息的跳时隙传输测试分析。实验结果表明:激光声是一种脉冲球源,在水下能量波阵面上均匀分布,激光声向外径向传播,传输过程中幅度与距离成反比。利用 PPM 跳时隙的字节组帧信息传输,通过合理选择低调制阶数的 PPM 类型,有利于实现快速响应和帧同步处理,可降低长信息帧在传输过程中受到信道随机噪声干扰而导致的接收不完整错误。若通信双方的时隙导频码类型采用更多形式组合,实现更为复杂的时隙跳变技术,则有利于减少信号被截获、破译的概率。研究结果充分体现了激光声在水下稳定的频谱特性和传输特性。以脉冲激光远程作用于指定水域的水介质激发声波实现通信,大大提高了系统通信作业的灵活性和主动性,在空中到水下的环境有一定的应用价值。

参 考 文 献

[1] 何奇毅,宗思光. 跨空水介质激光声技术发展分析与思考[J]. 激光与红外, 2019, 49(1): 3-8.
He Q Y, Zong S G. Analysis and thinking about the development of air and water crossed laser acoustic technology [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(1): 3-8.

[2] Wang Y N, Zhang Q H, Zhu Z, et al. Laser streaming: turning a laser beam into a flow of liquid[J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1700555.

[3] Tagawa Y, Yamamoto S, Hayasaka K, et al. On pressure impulse of a laser-induced underwater shock wave[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 808: 5-18.

[4] Fitzpatrick A, Singhvi A, Arbabian A. An airborne sonar system for underwater remote sensing and imaging[J]. IEEE Access, 2020, 8: 189945-189959.

[5] Liamshev L M, Naugolnykh K A. Optical generation of sound-nonlinear effects: a review[J]. Akusticheski Zhurnal, 1981, 27(5): 641-668.

[6] Shooter J A, Muir T G, Blackstock D T. Acoustic saturation of spherical waves in water [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1974, 55(1): 54-62.

[7] Muir T G, Culbertson C R, Clynch J R. Experiments on thermoacoustic arrays with laser excitation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 59(4): 735-743.

[8] Sergey V E, Andrey K M, Leonid M L. Laser sound technique for the remote control of underwater oceanographic instrumentation[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2004, 90(2): 263-271.

[9] 程旭. 激光激发声波技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
Cheng X. Research on laser-generated sonic wave [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[10] Antonelli L, Blackmon F. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(6): 3393-3403.

[11] Antonelli L, Blackmon F. Experimental investigation of acousto-optic communications [C]//Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492), September 22-26, 2003, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 100-108.

[12] Yellaiah J, Prem K P. Input pulse duration effect on laser-induced underwater acoustic signals[J]. Applied Optics, 2021, 60(16): 4582-4590.

[13] 赵安邦,董海防,孙国仓,等. 一种应用于水下目标探测的激光声系统[J]. 声学技术, 2009, 28(1): 14-16.
Zhao A B, Dong H F, Sun G C, et al. A laser-acoustic system for underwater target detection[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(1): 14-16.

[14] 王晓宇,王江安,宗思光,等. 水下光击穿的能量分布研究[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002007.
Wang X Y, Wang J A, Zong S G, et al. Research on energy distribution after laser-induced optical breakdown underwater [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1002007.

[15] 李天松,阳荣凯,黄艳虎,等. 水下激光脉冲时延特性的仿真分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110102.
Li T S, Yang R K, Huang Y H, et al. Simulation and analysis of time delay characteristics of underwater laser pulse[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110102.

- [16] 石啸松, 廉帅, 窦银萍, 等. 入射角度对激光诱导水等离子体声信号特性的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0608001.
Shi X S, Lian S, Dou Y P, et al. Effect of angle of incidence on acoustic signals characteristics of laser-induced water plasma[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0608001.
- [17] 李胜勇, 吴荣华, 王晓宇, 等. 液体中激光声传输特性[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0406006.
Li S Y, Wu R H, Wang X Y, et al. Properties of laser-induced acoustic signals transmission in liquid[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 0406006.
- [18] 仵宗钦, 刘鹏. 基于 FPGA 的高速脉冲位置调制激光通信系统设计[J]. 激光杂志, 2015, 36(8): 120-123.
Wu Z Q, Liu P. The design of high-speed pulse position modulation laser communication system based on FPGA[J]. Laser Journal, 2015, 36(8): 120-123.
- [19] 江洪彦, 邱洪斌, 何宁, 等. 基于变激光脉冲重复率的语音传输研究[J]. 物理学报, 2018, 9: 1291-1296.
Jiang H Y, Qiu H B, He N, et al. Research on the optoacoustic communication system for speech transmission by variable laser-pulse repetition rates[J]. Results in Physics, 2018, 9: 1291-1296.
- [20] 李鹏, 赵扬, 周志权, 等. 一种跨介质的空中-水下激光致声探测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 20200310.
Li P, Zhao Y, Zhou Z Q, et al. Research on laser induced acoustic detection of trans-media aerial-underwater[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 20200310.

Underwater Time Slot-Hopping Data Transmission Based on Laser-Induced Acoustic Waves

Liao Xin^{1,2*}, Jiang Hongyan^{1,2}, He Ning^{1,2**}

¹ School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

² Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract

Objective Aiming at the constraints in cross-medium wireless communication and according to the characteristics of atmospheric and oceanic communication, the laser-induced acoustic communication adopting time slot-hopping pulse position modulation (PPM) is proposed to achieve cross-medium signal transmission. The mechanism of optoacoustic effect is studied. Meanwhile, the time- and frequency-domain characteristics of the laser-induced sound in the underwater conditions are analyzed. Combining atmospheric optical wireless communication with underwater acoustic communication and reasonably selecting time slot combination for hopping, the reliability and security for information transmission can be effectively improved. Based on the pulsed laser-induced sound, a time slot-hopping PPM communication link from air to underwater is established, where field programmable gate array (FPGA) is adopted to achieve coding and decoding. Tests for information transmission by frames are accomplished. Note that each frame has one-byte data. Using time slot-hopping technology can effectively reduce the interception probability of the transmitted signal.

Methods The interaction of laser pulse with gas, liquid and solid can induce acoustic waves. Firstly, according to the basic theory of laser-induced acoustic waves in liquid, including the effects of laser characteristics, liquid characteristics and incidence angle on optoacoustic energy conversion efficiency as well as excitation mechanism, a technical methodology for cross-medium communication from air to water is introduced in this paper, where the pulsating acoustic source radiates radially outward in the form of spherical wave (Fig. 1). Subsequently, the PPM format with variable time slots is used. Framing with two pilot pulses and one-byte data, three frames with different time slots are presented (Fig. 3). Finally, the coding and decoding of time slot-hopping PPM is achieved by FPGA, and then the experimental test platform based on laser-induced acoustic waves is established for data transmission and analysis (Fig. 7).

Results and Discussions By the experimental analysis of the time- and frequency-domain characteristics of laser-induced acoustic waves (Fig. 6), it has been shown that the time-domain waveform has many peaks, and the sound pulse gradually decays to disappear. By Fourier transform, the spectral characteristic is obtained, wherein the peak frequency is about 30 kHz. The components with frequencies greater than 100 kHz decay rapidly, and the energy is concentrated at the components with lower frequencies. The noise is regarded as an additive white Gaussian noise (AWGN), whose amplitude is much lower than that of the laser-induced sound pulse. The technologies of time slot-hopping PPM and framing with one-byte data are adopted. A combination of 256PPM, 16PPM and 4PPM is considered and the received waveform is obtained for the case that the optical energy arriving at the water surface is greater than 15 mJ, as shown in Fig. 8, wherein the top one represents the waveform detected and amplified by a hydrophone and the bottom one is a shaped signal as the input of the FPGA for decoding. The relationship between the data rate and frame length is discussed by comparisons among the three modulation orders (i. e., 8, 4 and 2, respectively). The data rate depends much on the modulation order and the time slot duration of PPM. Assuming that the laser source meets the requirements of pulse repetition frequency and response time, a data rate of 5 kbit/s could be achieved in the laser-induced acoustic communication with a time slot duration of 10 μ s. In experiments, the time slot duration is set as 10 ms. Experimental

results show that the symbol error rate could be lower than 10^{-5} if the optical energy arriving at the water surface is greater than 25 mJ. Combining more PPM formats with different orders is beneficial to reduce the probability of interception.

Conclusions In the cross-medium communication from air to water based on the laser-induced sound, the optoacoustic integration is used to give full play to the advantages of atmospheric laser communication and underwater acoustic communication. Due to the controllable position of the induced acoustic pulse by airborne laser remote excitation, the flexibility and initiative of communication operations could be greatly improved. The characteristics of laser-induced acoustic source can meet the requirement of the frequency range in underwater acoustic communication. Using time slot-hopping technology and reasonably selecting time slots and time slot combination can effectively enhance the anti-interception ability, which could provide reference for the air-to-water communication.

Key words laser optics; optoacoustic effect; laser-induced acoustic wave; time slot-hopping; framing with one-byte data; pilot code