

# 激光与光电子学进展

## 基于幅度调制激光干涉技术的水下声信号测量研究

陆天泽, 李宁\*, 黄孝龙, 翁春生

南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094

**摘要** 为了提高激光干涉测量法的抗干扰能力, 提出幅度调制激光干涉测量法。使用可调谐半导体激光器的高频调谐特性对激光信号进行幅度调制, 通过水表面反射光与参考光的干涉来获取水下声场的信息, 采用锁相放大解调制法实现激光干涉水下声信号的准确反演。对幅度调制激光干涉水下声信号特征进行模拟, 搭建基于光纤耦合式的激光干涉水声测试系统, 采用 10 kHz 的调制频率驱动中心波长为 1405 nm 的尾纤输出可调谐半导体激光器, 并对水下声信号进行测量。结果表明, 所提方法能够有效提取水下不同频率和不同强度声信号的振动特征, 在频率为 2 Hz 的脉冲噪音的干扰条件下, 相较于传统激光干涉测量法, 所提方法测量的信噪比提高了 10 dB 以上, 增强了水声测量的抗干扰能力。

**关键词** 测量; 激光干涉; 水下声信号; 光纤光路; 调制解调; 频谱分析

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0912006

### Underwater Acoustic Signal Measurement Based on Amplitude-Modulated Laser Interference Technology

Lu Tianze, Li Ning\*, Huang Xiaolong, Weng Chunsheng

National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** To improve the anti-interference ability of the laser interferometry acoustic measurement method, the amplitude modulated laser interferometry is proposed. Using the high-frequency tuning characteristics of a tunable semiconductor laser to modulate the laser signal amplitude, the underwater sound field information is obtained from the interference of the reflected light on the water surface and the reference light. In addition, the phase-locked amplification and demodulation method is used to obtain the laser interferometry underwater sound signal with accurate inversion. The characteristics of the amplitude-modulated signal are simulated, and a fiber-coupled laser interferometry underwater acoustic test system is built. A modulation frequency of 10 kHz is used to drive a pigtail with a center wavelength of 1405 nm to output a tunable semiconductor laser, and the sound signal is tuned down for measurement. Results show that the proposed method can effectively extract the vibration characteristics of underwater acoustic signals with different frequencies and intensities. Under the interference of pulse noise with a frequency of 2 Hz, the proposed method can be used to measure the signal noise better than the traditional measurement method. The ratio is increased by more than 10 dB, which enhances the anti-interference ability of the underwater acoustic measurement.

收稿日期: 2020-09-28; 修回日期: 2020-10-10; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 中国国家留学基金(201906845059)、江苏省自然科学基金青年科学基金(BK20190439)、中央高校基本科研业务费专项(30919011258)

\*E-mail: phoenixkyo@163.com

**Key words** measurement; laser interference; underwater acoustic signal; fiber optic path; modulation and demodulation; spectrum analysis

**OCIS codes** 120.3180; 010.7340; 070.1060; 070.1675

## 1 引言

水下目标的特征提取及识别一直都是军用和民用领域的热点研究问题,实现水下声信号的测量是突破水下通信<sup>[1]</sup>、水体探测<sup>[2]</sup>以及水下目标定位<sup>[3]</sup>等难题的基础,这对我国新型装备的制造以及深远海探测与安保等多个领域具有重要的作用<sup>[4-6]</sup>。多年来,传统的船载声呐技术和以光纤水听器为代表的光学方法是实现水下声信号测量的主要技术手段,但在实际应用过程中受到探测环境的限制,难以满足灵活性和隐蔽性好的目标捕捉要求<sup>[7-8]</sup>。激光-声联合探测技术具有机动灵活和快速准确遥感探测等优点,为此日益受到国内外学者的关注<sup>[9-10]</sup>。该技术是指由平台发射一束激光到空气-水界面上,通过探测水下声源所引起的水表面波来获取水下声场的特征信息。围绕水表面波的检测问题,根据探测信号的获取和解调方法的不同,国内外学者主要采用4类光学检测方法,如激光衍射法<sup>[11]</sup>、光通量法<sup>[12]</sup>、多普勒测振法<sup>[13]</sup>和激光干涉法<sup>[14-17]</sup>。陕西师范大学的苗润才等<sup>[11]</sup>采用了激光衍射法检测水表面波,理论上推导出条纹角宽度、调制图样光强度和水表面声波之间的解析关系,并通过实验获得了高反衬度的衍射图案,验证了激光衍射法可以成功检测几十到几百赫兹的液体表面声波,但此方法受到表面声波的频率不低于衍射条件的限制,检测过程中需保持水面静止。哈尔滨工程大学的方尔正等<sup>[12]</sup>采用了激光光通量法得到水表面质点的振动位移,分析了水面微振动的物理过程及其表现的水声理论实质,能够直接证明水下声场的存在,但其易受到水面自然波动和外界杂散光的影响。Antonelli等<sup>[13]</sup>使用激光多普勒测振仪直接探测了水表面,通过多普勒频移来解算出水表面波的信息,可以实现水表面声波的频率和声压级的测量,但是此方法在检测过程中难以准确分离环境扰动和水表面声波,而且易受到反射面的影响。哈尔滨工业大学的张晓琳等<sup>[15]</sup>基于分立元件的激光干涉法对水表面声波的探测进行了相关研究,可以有效检测几百赫兹到几千赫兹的水下声源信号,基于分立元件的激光干涉系统的探测精度较高,但实验系统体

积比较庞大,干涉效果易受到外界环境光和振动等的影响。中国科学院声学研究所和中国科学院上海光学精密机械研究所基于多普勒相干检测技术开发了一套激光测报系统,通过对水面质点的振动速度进行非侵入式探测可以获得水下声信号<sup>[15-16]</sup>。烟台大学的曹增辉等<sup>[17]</sup>基于全光纤结构的激光干涉法对水表面声波进行了探测,可有效探测到水下声信号,该系统采用全光纤结构,具有易于系统集成和光路简单可靠的优点,但由于光纤激光器的光源发射功率较低以及探测光信号较弱,所以易受到外界杂散光的影响。

激光干涉测量法对光学器件的测量精度要求高,但激光器和探测器在低频区域内的噪音相对较大,同时测量过程中易受到背景辐射信号的干扰。目前,半导体激光器的使用越来越广泛<sup>[18]</sup>,通过对可调谐半导体激光器加载驱动电流,可以实现半导体激光器输出功率的高频调制,从而使干涉测量法在高频区域内完成,并且可以在后续信号处理过程中将非调制的背景干扰信号去除。此外,高频区域内的激光噪音和探测器的热力噪音都很小,有利于提高测量的信噪比。

基于以上思考,本文提出基于幅度调制激光干涉技术的水下声信号测量方法。将可调谐半导体激光器作为光源,利用高频幅度调制特性实现对激光干涉水下声信号的准确测量。通过仿真和实验研究基于幅度调制激光干涉技术的水下声源的频率和强度等特征信息,在实验室内验证其对于不同频率水下声信号的测量能力和抗干扰能力。所得的研究结果可为强噪音环境下激光干涉水声测试研究提供技术支撑。

## 2 幅度调制激光干涉水声测试原理

### 2.1 激光干涉水声测量

水下声源在工作过程中会引起水表面波动,水下声源所引起的水表面波的振动频率等于声源的频率<sup>[19]</sup>。当水下声源发声时,声源的振动通过水体传导会引起水表面的振动,而且只有与振动源频率相同的水表面波才具有显著振幅。使用激光照射水面,使携带着水表面波信息的散射光和入射光发

生干涉,则水表面波振幅的变化会导致干涉光的光程差发生改变,通过对干涉信号进行解调可获得水表面的振动频率,即可得到水下声源的振动频率信息。

当水下存在声源时,将在水面形成水表面波,设水表面波的振动表达式为

$$S(t) = A_x \sin(2\pi f_x t + \varphi_x), \quad (1)$$

式中:  $A_x$ 、 $f_x$  和  $\varphi_x$  分别为水表面波的振幅、频率和相位;  $t$  为时间。受到自然波动的影响,水表面始终存

在低频振动,可以用多个正弦信号叠加的形式来表示,其与水下声源所引起的合成振动的表达式为

$$S(t) = \sum A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) + A_x \sin(2\pi f_x t + \varphi_x), \quad (2)$$

式中:  $A_n$ 、 $f_n$  和  $\varphi_n$  分别为自然波动所引起的水表面波的振幅、频率和相位。当激光照射处于波动状态的水面时,这会产生携带水表面波信号的散射光,将散射光与参考光进行干涉,则探测光的光程差发生改变。干涉信号的光强表达式为

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \left[ \sum A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) + A_x \sin(2\pi f_x t + \varphi_x) + \Delta\varphi \right]\right\}, \quad (3)$$

式中:  $I_1$  和  $I_2$  分别为散射光和参考光的光强;  $\Delta\varphi$  为初始条件下水面散射光与参考光之间的光程差;  $\lambda$  为激光波长。对(3)式进行进一步简化,令

$$\begin{cases} \phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ \sum A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) + \Delta\varphi \right] \\ M = \frac{4\pi A_x}{\lambda} \\ \varphi_x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

利用三角函数将(3)式进行展开,干涉光信号经过光电探测器后转换成电信号,表达式为

$$V_{\text{out}} = V_0 \left\{ \cos \phi_0 \cos \left[ M \sin(2\pi f_x t) \right] - \sin \phi_0 \sin \left[ M \sin(2\pi f_x t) \right] \right\}, \quad (5)$$

式中:  $V_0$  为交流光电信号的幅值。将(4)式运用贝塞尔函数作傅立叶级数展开,表达式为

$$V_{\text{out}} = V_0 \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} 2n J_{2n}(M) \cos \phi_0 \cos(4n\pi f_x t) - \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) J_{2m+1}(M) \sin \phi_0 \sin[(4m+2)\pi f_x t] \right\}, \quad (6)$$

式中:  $J_o(M)$  为第一类的  $o$  阶贝塞尔数。由(6)式可知,干涉信号中包含以水下声信号  $f_x$  为基频的各次谐波项之和。由于受到自然水表面波扰动的影响,时域信号中包含  $\cos \phi_0$  和  $\sin \phi_0$  的乘积项。根据傅立叶变化的频移特性,即在频率轴上向左右平移固定的相位,可以得到以信号频率为中心频率的频谱图,通过对信号进行滤波,并通过频谱分析和频率解调就可以获得水下声源的频率  $f_x$ 。

## 2.2 可调谐半导体激光幅度调制

当测量光源采用可调谐半导体激光器时,通过控制激光器的驱动电流来实现对激光幅值的调制。目前,常用的激光器为DFB(Distributed Feedback Laser)可调谐半导体激光器,其输出激光强度  $I$  与输入驱动电流  $i$  可采用二次关系式进行描述,表达式为

$$I = a_2 \times i^2 + a_1 \times i + a_0, \quad (7)$$

式中:  $a_2$ 、 $a_1$  和  $a_0$  分别为初始激光强度随驱动电流变化的非线性系数、线性系数和常数。在调制频率较低(小于 100 kHz)和驱动电流幅值有限(小于 100 mA)的条件下,激光器的非线性输出特性可忽

略,激光强度变化量  $\Delta I$  和驱动电流变化量  $\Delta i$  近似呈线性关系,表达式为

$$\Delta I = a_1 \times \Delta i. \quad (8)$$

值得注意的是,激光器的输出波长在驱动电流  $i$  的作用下同样发生变化。在忽略激光器的非线性输出特性的情况下,激光波长变化量  $\Delta \lambda$  和驱动电流变化量  $\Delta i$  同样呈现线性关系,表达式为

$$\Delta \lambda = b_1 \times \Delta i, \quad (9)$$

式中:  $b_1$  为初始激光强度随驱动电流变化的线性系数。由(9)式可知,通过调整驱动电流的大小,可以实现对可调谐半导体激光器波长扫描范围的控制。此外,可调谐半导体激光器的波长扫描范围还随着调制频率的增加而改变。在驱动电流为 100 mA 和 140 mA 的作用下,可调谐半导体激光器的波长扫描范围随调制频率变化的曲线如图 1 所示。从图 1 可以看到,随着激光器调制频率的增加,波长扫描范围迅速减小;在高频的工作条件下(大于 100 kHz),驱动电流为 100 mA 的激光器的波长扫描范围不足  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  (小于 0.1 nm)。利用仿真模拟可以确定,

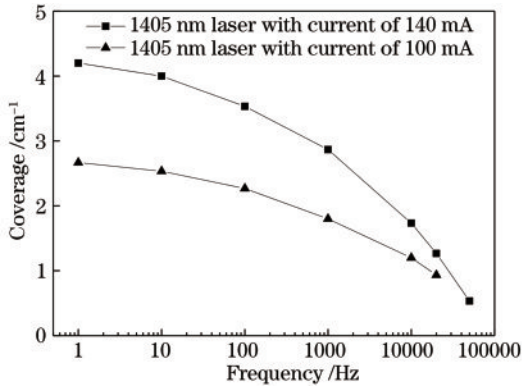


图 1 不同电流驱动下 DFB 激光器的波长扫描范围随调制频率变化的曲线

Fig. 1 Curves of wavelength scanning range of DFB laser driven by different currents as function of modulation frequency

在调制频率为 10 kHz 的条件下,当激光器的波长扫描范围小于 10 nm 时,对干涉测量而言几乎无影响,

$$V = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [V_{\text{mod}}(t) \times V_{\text{ref}}(t)] dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{V_{\text{out}} \times V_{\text{ref}}}{4T} \int_{-T}^T \left\{ \cos[(\omega_{\text{mod}} - \omega_{\text{ref}})t + (\varphi_{\text{mod}} - \varphi_{\text{ref}})] - \cos[(\omega_{\text{mod}} + \omega_{\text{ref}})t + (\varphi_{\text{mod}} + \varphi_{\text{ref}})] \right\} dt, \quad (11)$$

式中:  $T$  为积分区间的值。将调制后的干涉信号与解调制信号输入相敏检测器中,再将输出的信号输入低通滤波器中以滤除信号中的交流部分,即可得到解调后的干涉信号  $V$ 。从(11)式可以看到,当调制信号与解调制信号同频同相,即  $\omega_{\text{mod}} = \omega_{\text{ref}}$  和  $\varphi_{\text{mod}} = \varphi_{\text{ref}}$  时,  $V$  与  $V_{\text{mod}}$  和  $V_{\text{ref}}$  的关系可表示为

$$V \propto V_{\text{out}} \times V_{\text{ref}} \quad (12)$$

由(12)式可知,解调后的水声干涉信号  $V$  正比于  $V_{\text{out}}$ , 可以实现对水声干涉信号的准确还原。由于水声干涉测量集中在特定的频率范围内,可以减少干扰噪声对测量结果的影响。幅度调制激光干涉水声的解调制流程如图 2 所示。

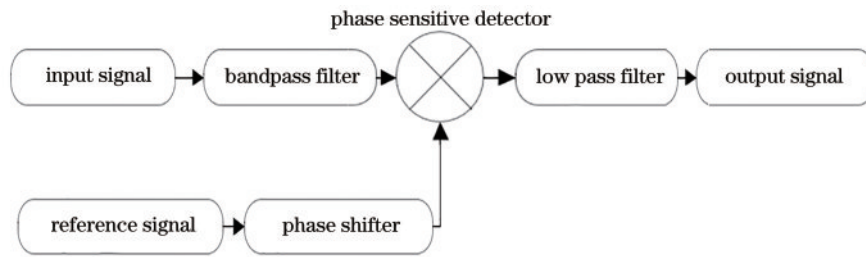


图 2 幅度调制激光干涉水声的解调制流程

Fig. 2 Demodulation process of amplitude modulated laser interferometer underwater sound

### 3 仿真分析

根据(3)式并仿真模拟分析水声干涉信号的特征。假设自然水表面含有三个不同频率的波动,设振幅  $A_{n1} = 60 \text{ nm}$ 、 $A_{n2} = 70 \text{ nm}$  和  $A_{n3} = 80 \text{ nm}$ , 频率  $f_{n1} = 2 \text{ Hz}$ 、 $f_{n2} = 5 \text{ Hz}$  和  $f_{n3} = 10 \text{ Hz}$ , 初相位  $\varphi_x = 0$ 。无水声源的仿真结果和频谱曲线如图 3 所示,使用光电探测器将接收到的激光干涉信号转换为电

因此可以忽略。

实验对可调谐半导体激光器加载高频正弦电流信号,并对输出激光强度进行高频处理。调制后的激光信号经过光电探测器后转换成电信号  $V_{\text{mod}}$ 。根据(3)式可知,  $V_{\text{mod}}$  可表示为

$$V_{\text{mod}} = V_0 \cos(\omega_{\text{mod}} t + \varphi_{\text{mod}}) \left\{ \cos \phi_0 \cos [M \sin(2\pi f_x t)] - \sin \phi_0 \sin [M \sin(2\pi f_x t)] \right\}, \quad (10)$$

式中:  $\omega_{\text{mod}}$  为调制频率;  $\varphi_{\text{mod}}$  为调制相位。为了获得调制信号抑制噪声的效果,调制信号的频率不应低于目标探测频率的 10 倍。利用同频同相信号  $V_{\text{ref}} \cos(\omega_{\text{ref}} t + \varphi_{\text{ref}})$  进行解调制,其中  $V_{\text{ref}}$  为解调信号的幅值,  $\omega_{\text{ref}}$  为解调信号的频率,  $\varphi_{\text{ref}}$  为解调信号的相位。根据锁相放大原理,在载波信号的特定倍频下提取干涉信号的测量值,表达式为

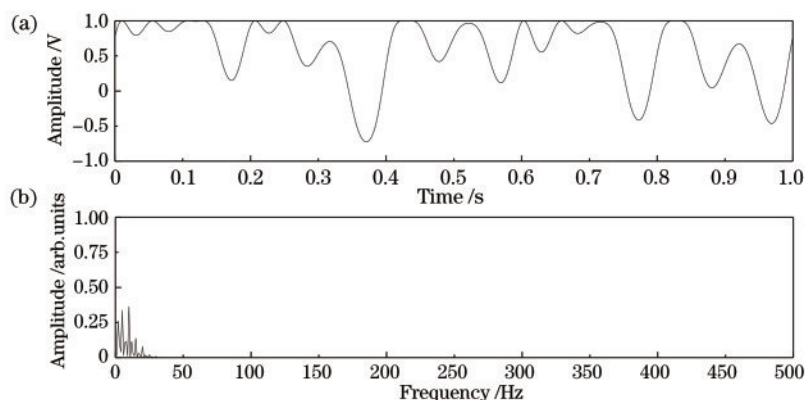


图3 无声源工况下干涉测量的时频图。(a)仿真结果;(b)频谱曲线

Fig. 3 Time-frequency diagram of interference measurement under silent source condition. (a) Simulation result; (b) spectrum curve

考虑到存在水下声源的激光干涉信号,通常水下声源所引起的水表面波的振幅在纳米数量级,因此设  $A_x = 40 \text{ nm}$ ,  $f_x = 200 \text{ Hz}$  和  $\varphi_x = 0$ ,水表面自然波动参数不变。频率为 200 Hz 的声源工况下的仿真结果和频谱曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看到,由水下声源导致自然水表面振动的曲线上出现频率为 200 Hz 的载波,时域信号发生高频脉动,频谱左侧可见一个频带,宽度等于最大多普勒频移,其与水面的振动速度有关;在频率为

200 Hz 处出现明显的振动特征,且信号频带以此频率为中心沿频率轴左右对称,频移宽度等于左侧低频信号的频带宽度。此外根据(6)式可以看到,在倍频处(400 Hz)同样出现了特征信号。采用文献[16]的方法计算出低频段各分量幅值之和为 2.3833,低频段频移 200 Hz 后的幅值之和为 0.4236,计算出调制比为 5.6263,根据贝塞尔函数表得到水表面波的振幅为 40.107 nm,这与设置值(40 nm)基本一致。

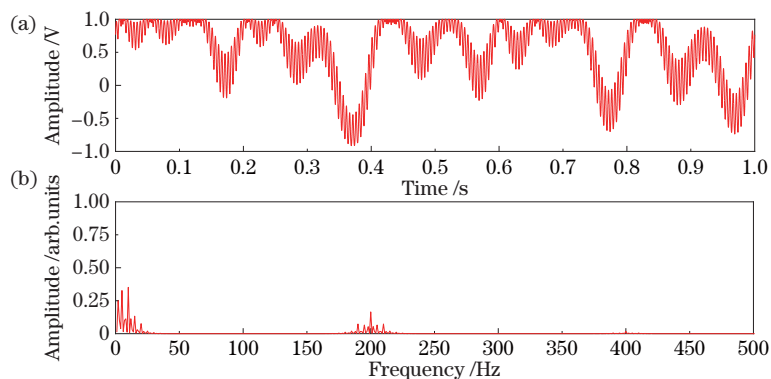


图4 频率为 200 Hz 声源工况下干涉测量的时频图。(a)仿真结果;(b)频谱曲线

Fig. 4 Time-frequency diagram of interference measurement with sound source of 200 Hz frequency. (a) Simulation result; (b) spectrum curve

将传统的激光干涉方法的测量结果与幅度调制激光干涉方法进行对比分析。模拟中采用频率为 10 kHz 的正弦波信号对激光强度进行调制,使激光器的输出功率发生变化。对水面所散射的激光信号与参考激光信号进行干涉,并在同频同相正弦波信号的作用下进行解调制。为了验证幅度调制激光干涉方法的抗干扰能力,在测量端引入激光强度幅值 10 倍的外部白噪音信号,用来模拟激光测量过程中外部噪音对水声测量的影响,其他工况条件

保持不变。传统的激光干涉法与幅度调制激光干涉法的测量结果如图 5 所示。

从图 5 可以看到,幅度调制激光干涉法的测量结果与传统的激光干涉法非常一致,均能准确反映声源在频率为 200 Hz 处的频率信息。由于外部干扰噪音的引入,幅值较小的倍频信号被噪音淹没。相比较而言,幅度调制激光干涉法可以有效抑制噪声,在仿真工况下频谱测量的信噪比提高了 6 dB 以上,使测量结果更精确。

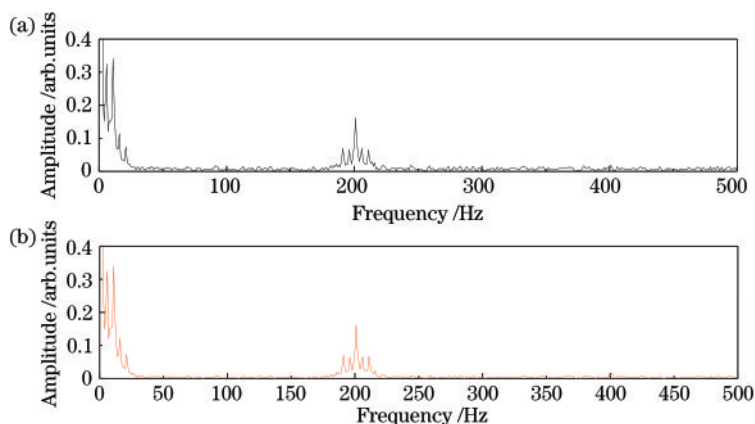


图5 频率为200 Hz声源工况下不同方法的干涉信号频谱。(a)传统的激光干涉方法;(b)幅度调制激光干涉方法

Fig. 5 Interference signal spectrum of different methods with sound source of 200 Hz frequency. (a) Traditional laser interferometry method; (b) amplitude modulated laser interferometry method

从(8)式可以看到,幅度调制激光干涉水下声信号的大小还与正弦调制信号的幅值相关,理论上增大调制信号的幅值可以增强水下声信号的特征。但受到可调谐半导体激光器性能的限制,随着调制频率的增加,激光器的输出能量变化范围逐渐减小,因此实际使用过程中增加调制信号的幅值对测量结果的影响有限。

## 4 实验研究

### 4.1 实验系统

在实验室内搭建幅度调制激光干涉水下声信号的测量系统,如图6所示。实验系统主要由水下声源及控制、光学测试和数据采集处理三个部分组成。

水下声源采用UWS-015型号的水下声源和MA-050型号的功率放大器,使用信号发生器将正弦驱动信号输入功率放大器中,控制水下声源发射单频声信号的频率,可发射的声信号频率范围为

$1 \times 10^2 \sim 2 \times 10^4$  Hz。

水声测量的方式采用光纤激光干涉方式。激光器选用中心波长为1405 nm的尾纤输出可调谐半导体激光器,使用Thorlabs ITC502型号的温度电流控制器来控制激光器的输出功率。为控制器加载高频驱动电流,可以实现对激光强度的调制。根据理论分析可知,当调制频率远大于目标探测频率时,即可获得较好的调制测量效果。实验中目标测量频率在500 Hz以下,设定的调制频率为10 kHz。这是由于在该频率以内,可调谐半导体激光器和探测器等光电设备的性能均较为稳定,此外调制频率已经远大于水声信号的频率,为此可以获得满意的测量结果。实验中同时对20 kHz和40 kHz的调制频率下的水声信号进行分析,测量结果一致。调制后的激光由光纤传至分光器中,根据测量过程需要分为两路。一路作为测量光路,通过光纤准直器入

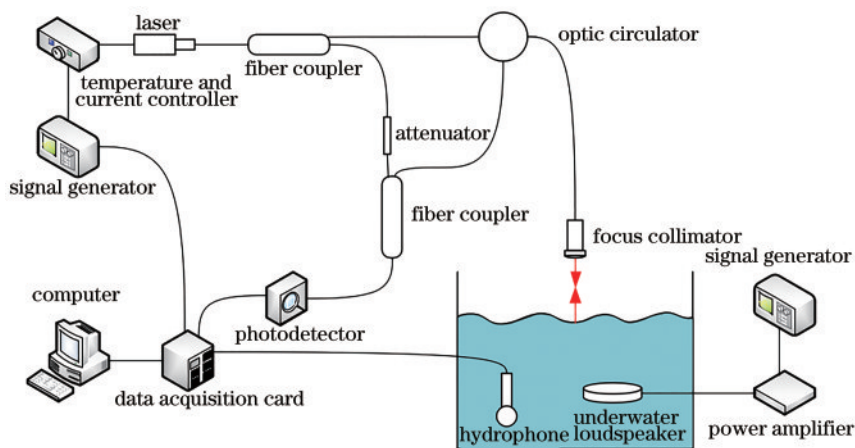


图6 实验系统示意图

Fig. 6 Schematic of experimental system

射到水面,经过待测水面反射后携带水表面振动信息进入耦合器内;另一路作为测量参考光路,通过衰减器后使其光强与反射光的光强基本保持一致,再连接至耦合器内。两路激光在耦合器接收端口处发生干涉,得到调制后的激光干涉水声测量信号。调制后的激光干涉信号被PDA50B型号的光电探测器接收,与同频同相正弦调制信号一同由NI-PXI1062Q型号的数据采集系统同步采集,通过

锁相放大运算对信号进行解调制,实现对激光干涉水声测量信号的还原。在 $1.5\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 大小的测量水箱内布置BK8105型号的水听器,用来采集与水下声源相关的声压数据,并与激光干涉水声测量结果进行对比分析。

#### 4.2 激光干涉测量信号分析

首先分析激光干涉水声测量的背景信号,平静水表面的自然波动测量结果如图7所示。

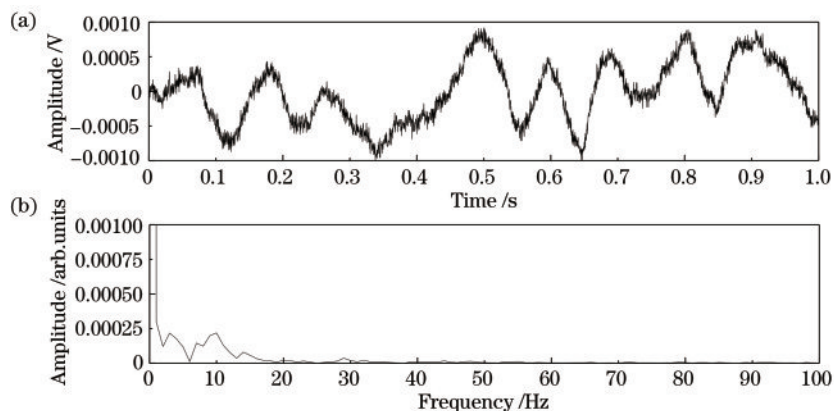


图 7 平静水表面的自然波动测量结果。(a)仿真结果;(b)频谱曲线

Fig. 7 Measurement results natural fluctuations on surface of calm water. (a) Simulation result; (b) spectrum curve

从图7可以看到,实验室环境下水表面自然波动的频率范围为 $0\sim 60\text{ Hz}$ ,峰值频率范围为 $0\sim 14\text{ Hz}$ ;通过对时域信号的分析可知,被测水面受到环境的影响而产生微小波动,导致激光强度信号随时间发生变化;将表面波振动位移的最大值在时域信号中所对应的点定义为辨向点,相邻辨向点之间的时间间隔等于水表面波的半周期,时域内相邻辨向点的时间间隔大多数介于 $8\sim 160\text{ ms}$ ,这可以计算出水表面波频率在 $3.0\sim 62.5\text{ Hz}$ 之间,与频域图中的频率分布基本吻合。

实验中对传统的激光干涉测试方法与幅度调

制激光干涉测试方法进行对比分析,两者系统组成相同。当采用传统的激光干涉水声测试法时,信号发生器关闭,无高频调制驱动电流信号,仅仅通过 $60\text{ mA}$ 的直流驱动激光器就可以输出稳定光强;当采用幅度调制激光干涉水声测试法时,信号发生器开始工作,在直流驱动信号上加载了 $2\text{ mA}$ 的高频调制电流信号,使得激光器强度发生高频调制,其他工况所得的结果完全一致。在声源频率设为 $200, 300, 400, 500\text{ Hz}$ 的条件下,测量得到的干涉信号频谱分析结果如图8所示。

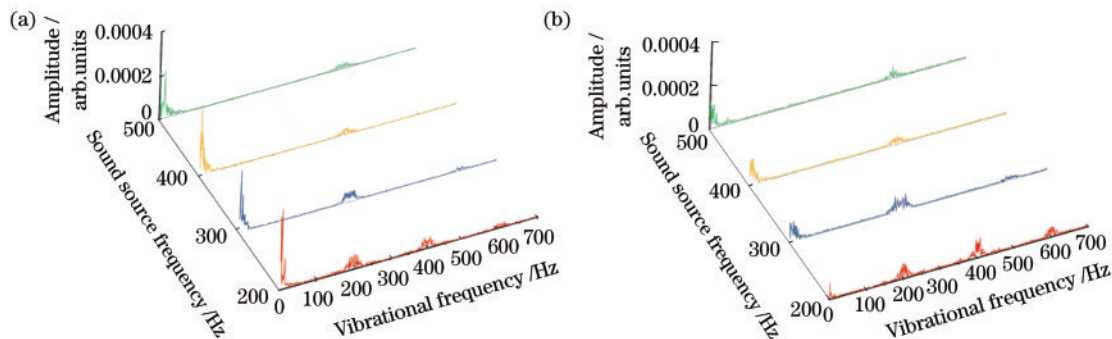


图 8 不同水下声源频率的工况下不同方法测量得到的干涉频谱图。(a)激光干涉法;(b)幅度调制激光干涉法

Fig. 8 Interferometric spectra measured by different methods under different underwater sound source frequencies. (a) Laser interferometry method; (b) amplitude modulated laser interferometry method

从图 8(a)可以看到,在水下声源振动频率的附近出现了明显的信号频谱带,该信号频谱带以振动频率为中心对称分布,左右平移量约为 25 Hz,与水自然波动所引起的低频带宽一致,这与理论分析结果吻合,验证了该方法的正确性。根据水表面声波理论,在水下声源发声强度不变的条件下,水下声源频率越高,引起的水表面波振幅越小,可探测得到的信号强度越小。从图 8(b)可以看到,振动频率处的幅值分别为  $6.26 \times 10^{-5}$ 、 $4.82 \times 10^{-5}$ 、 $3.02 \times 10^{-5}$  和  $2.53 \times 10^{-5}$ ,实验结果与理论结果一致。对比图 8

(a)和图 8(b)可以看到,幅度调制激光干涉测量方法的测量结果与传统的激光干涉方法基本一致,均能准确反映水下声信号的特征,但幅度调制激光干涉测量方法对低频段噪声的抑制效果更为明显。

在水下声源工作频率不变的条件下,分析水下声源发射功率变化的激光干涉信号,通过改变输入水下声源驱动电压来实现对水下声源发射功率的调节。在水下声源工作频率为 200 Hz 的条件下,采用幅度调制和非调制激光干涉测试方法得到的频谱结果如图 9 所示。

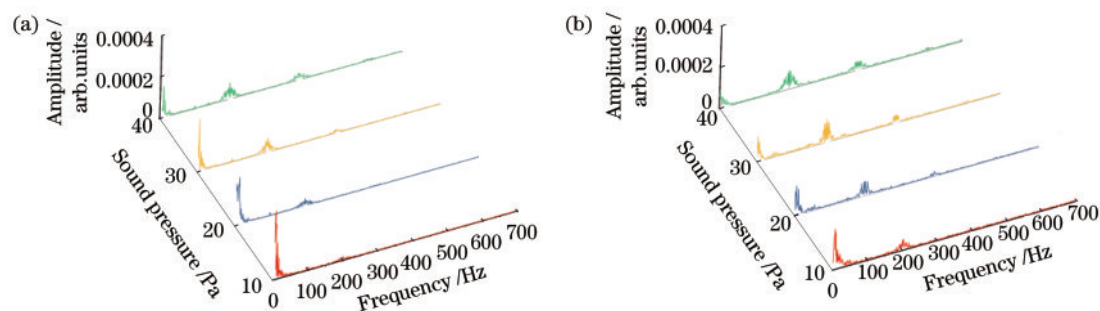


图 9 不同声压的工况下不同方法测量得到的干涉频谱图。(a)激光干涉测量法;(b)幅度调制激光干涉测量法

Fig. 9 Interferometric spectra obtained by different methods under different sound pressure conditions.

(a) Laser interferometry method; (b) amplitude modulated laser interferometry method

从图 9 可以看到,200 Hz 频率下的信号波峰幅值分别为  $1.91 \times 10^{-5}$ 、 $3.78 \times 10^{-5}$ 、 $7.00 \times 10^{-5}$  和  $8.02 \times 10^{-5}$ ,随着声源输出功率的增加,采用激光干涉测量方法探测得到的水下声信号强度也随之增大;幅度调制激光干涉测量方法与传统的激光干涉测量方法均能反映出当前水下声源的频谱信息;当水下声信号的幅值较弱时,传统的激光干涉水声测量法所得到的倍频信号被噪音淹没;幅度调制激光干涉测量方法可以很好地抑制测量噪音,得到的特

征信号更明显,尤其在幅值较小的倍频信号处。

为了验证幅度解调后得到的水下声信号频率和声源输出信号频率的一致性,进行多组对比实验,对同一组采集的数据中 8 个辨向点处分别进行计算,将得到的平均值作为单次测量的结果,重复进行三次相同工况下的实验并计算出标准偏差<sup>[20]</sup>,将三组数据中与设定的水下声源输出信号频率偏差最大的一组作为测量数据,从而计算出测量误差,实验数据如表 1 所示。

表 1 水下声源的频率测量结果

Table 1 Frequency measurement results of underwater sound sources

Frequency /Hz	Frequency demodulation result /Hz			Standard deviation /Hz	Maximum relative error /%
	1st group	2nd group	3rd group		
200	199.75	200.13	199.88	0.19	0.13
300	300.00	299.63	299.88	0.19	0.12
400	400.13	400.13	400.25	0.07	0.06
500	499.88	499.75	500.50	0.40	0.10

从表 1 可以看到,三组测量数据中最大的标准偏差为 0.40 Hz,最大相对误差为 0.13%,证明基于幅度调制的激光干涉测量系统能够有效得到不同频率下的水下声信号。

当参考光的光强和测量光接近时,干涉测量的信噪比最佳。当对测量出的干涉信号进行频谱分

析时,倍频处的特征明显。由于参考光中不携带水表面的振动信息,因此当参考光的强度明显大于测量光时,参考光中的噪音更明显,而有效的干涉信息并未显著增加,从而降低了测量信噪比。参考光与测量光的光强比分别为 10:1 和 1:1 的测量结果如图 10 所示。从图 10 可以看到,当参考光的强度



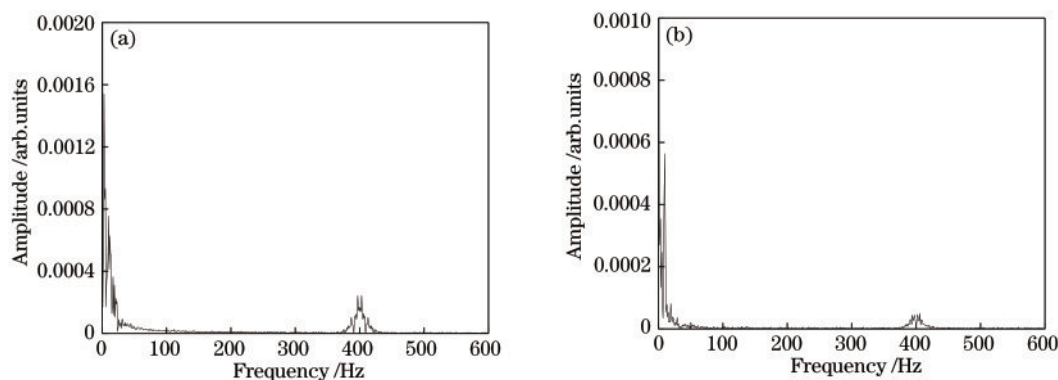


图 10 不同光强比的频谱图。(a) 10:1;(b) 1:1

Fig. 10 Spectrum diagrams of different light intensity ratios. (a) 10:1; (b) 1:1

明显大于测量光时,低频段噪音相对增大,不利于测量结果的分析,因此实验过程中参考光和测量光的光强均保持一致,强度比误差控制在 2% 以内。

实验系统误差主要来自如下几个方面:1)光源及探测设备,尽管通讯波段的半导体激光器与探测器等光电设备的性能较为稳定,但长时间使用仍然受激光器本身噪音、探测器热力噪音、外界温度、实验台架振动等因素的干扰,而在高频测量区域内激光器本身噪音和探测器热力噪音都很小,因此调制测量技术具有一定优势;2)声源发声性能,实验中使用信号发生器形成特定频率的正弦波驱动声源发声,结合声源本身的发声性能会导致测量频率与实际测量频率之间存在一定误差;3)背景噪音误差,测量过程中探测器得到的信号存在一定的背景干扰,这会对分析结果产生影响,而采用调制测量技术可以进一步抑制背景信号,从而提高信噪比。

通过仿真模拟的频谱来得到水表面波对检测信号的调制深度,利用贝塞尔函数来计算出水面波所引起的振动幅度。为了便于对比,使用 BK8105 型号的水听器对水下不同位置处的声场进行测量。声学换能器放置在水下 50 cm 处,将水听器分别放置在声学换能器正上方与水面之间的距离  $A$  分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m, 测量结果如表 2 所示。从表 2 可以看到,接近声学换能器正上方水面处测量得到的声压最大。

对接近声学换能器正上方水面处的水声光学干涉测量结果与水听器测量结果进行分析,将水听器的测量结果作为标定信号,并与激光干涉方法计算得到的振幅进行对比,结果如图 11 所示。

从图 11 可以看到,当水下声源的工作频率不变时,由干涉信号反演出的水表面声波振幅与水下

表 2 水下声源的声场测量结果

Table 2 Measurement results of sound field of underwater sound source

Frequency/ Hz	Sound pressure/Pa				
	$A=0$	$A=0.3\text{ m}$	$A=0.6\text{ m}$	$A=0.9\text{ m}$	$A=1.2\text{ m}$
100	26.5949	11.0883	3.9462	2.1954	0.8300
200	35.1692	14.8085	6.0368	3.4204	1.9555
300	30.9681	13.3478	6.0979	3.5197	1.9816
400	38.6410	16.8858	8.2382	4.7115	2.7482
500	61.2263	26.6857	13.2815	7.8471	5.0931

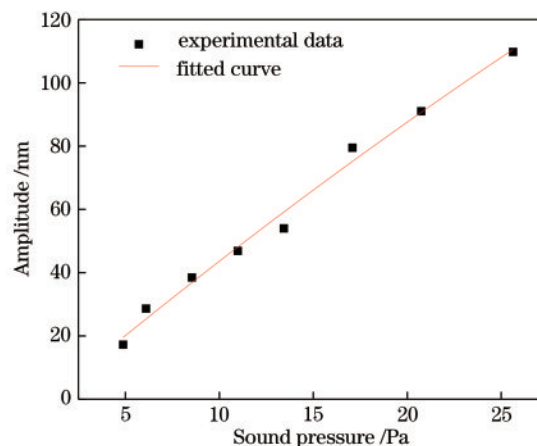


图 11 不同声压工况下水表面波的振幅测量结果

Fig. 11 Amplitude measurement results of water surface waves under different sound pressure conditions

声源声压呈线性关系,线性度达到 0.99。实验测试结果表明,激光干涉法能够准确地实现水表面波振幅的测量。为了减少实验中杂散光等因素的干扰,将探测系统搭建在暗室环境中,同时采用传统的激光干涉法与幅度调制激光干涉法在同一时间内多次交替测量,多次测量结果的相对误差低于 0.10%。为了定量分析光噪音对测量结果的影响,

在探测端增加脉冲光噪音的干扰信号,噪音光强度为激光测量信号的 2 倍,脉冲频率为 2 Hz, 占空比

为 50%, 观察两种方法的抗干扰能力, 结果如图 12 所示。

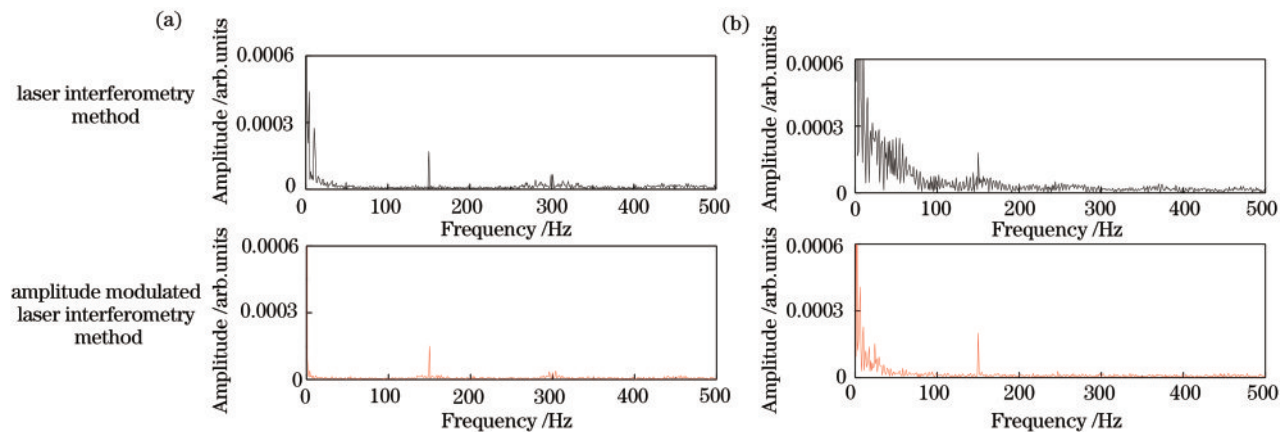


图 12 不同方法在噪音干扰下的测量结果。(a)无光学噪音干扰测量结果;(b)添加光学噪音干扰测量结果

Fig. 12 Measurement results of different methods under noise interference. (a) Measurement results without optical noise interference; (b) measurement results with optical noise interference

从图 12 可以看到, 当无噪音干扰时, 两个方法对水下声信号特征的捕捉能力均能令人满意, 但是在受到 2 Hz 频率的脉冲噪音的干扰条件下, 光学噪音对传统的激光干涉测量法的测量结果的影响严重, 测量信噪比由 28.05 dB 降低至 17.78 dB, 幅度调制激光干涉测量法可将外部不相关噪音信号进行有效抑制, 测量信噪比由 28.38 dB 降低至 27.42 dB, 明显提高该方法的测量精度和抗干扰能力。

## 5 结 论

本文提出基于幅度调制的激光干涉测量方法, 理论分析幅度调制激光干涉测量方法的测量过程并对其进行模拟仿真, 验证幅度调制激光干涉测量方法对水下声源频率特性的捕捉能力以及抗干扰能力。在实验室中搭建基于光纤干涉方式的水声测试系统, 使用高频正弦电流对中心波长为 1405 nm 的尾纤输出可调谐半导体激光器进行调制, 对不同工况下水下声源频率信息进行在线测量分析。研究结果表明, 基于幅度调制的激光干涉测量方法可以实现对水下声源工作特性的准确测量, 通过频谱分析可以解调出水下声信号的频率和振幅等信息; 在其他因素不变的条件下, 从水面探测到激光干涉水下声的信号强度与声源频率成反比且与声源声压成正比; 采用幅度调制工作方式可以有效抑制低频区的激光噪音和探测器热力噪音, 同时降低外部光学噪音对测量结果的影响, 提高测量的信噪比, 具有明显的技术优势。

## 参 考 文 献

- [1] Wang T, Han B, Shi K, et al. Underwater LED communication based on secondary light distribution with total internal reflection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0806001.  
王涛, 韩彪, 史魁, 等. 基于全内反射透镜二次配光的水下 LED 通信研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0806001.
- [2] Zhao X W, Wang Y Y, Song L P, et al. Underwater target imaging based on computational integral imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0109001.  
赵雪微, 王尧尧, 宋丽培, 等. 基于计算集成成像的水下目标成像 [J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0109001.
- [3] Xie Z X, Li J P, Chi S K. Underwater binocular measurement method based on line-structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0504004.  
解则晓, 李俊朋, 迟书凯. 基于线结构光的水下双目测量方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0504004.
- [4] Cho H, Gu J, Joe H, et al. Acoustic beam profile-based rapid underwater object detection for an imaging sonar [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, 20(1): 180-197.
- [5] Spears A, Howard A M, West M, et al. Determining underwater vehicle movement from sonar data in relatively featureless seafloor tracking missions [C] // *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, March 24-26,

- 2014, Steamboat Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2014: 909-916.
- [6] Zong S G, Wang J A, Ma M K, et al. Investigation of laser-induced acoustics signal for target detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1332-1337.  
宗思光, 王江安, 马明奎, 等. 水下目标探测的激光声特性[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1332-1337.
- [7] Beverini N, Firpi S, Guerrini P, et al. Fiber laser hydrophone for underwater acoustic surveillance and marine mammals monitoring [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7994: 79941D.
- [8] Zhao P C. Study status and development trend of foreign sonar technology [J]. Modern Radar, 2016, 38(8): 20-24, 69.  
赵培聪. 国外声呐技术研究现状与发展趋势[J]. 现代雷达, 2016, 38(8): 20-24, 69.
- [9] Farrant D, Burke J, Dickinson L, et al. Opto-acoustic underwater remote sensing (OAURS) - an optical sonar? [C]//OCEANS'10 IEEE Sydney, May 24-27, 2010, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2010: 11595624.
- [10] Chen S Z, Zhang X L, Wang B, et al. Review on the progress of water surface acoustic wave inspection for the laser-acoustic detection technique [J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(3): 1-7.  
陈世哲, 张晓琳, 王波, 等. 激光-声联合探测中水表面声波检测方法进展[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(3): 1-7.
- [11] Wang Y M, Miao R C, Ma J, et al. Detection of diffraction light field of low-frequency underwater signal [J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 686-689.  
王玉明, 苗润才, 马静, 等. 低频水下声信号衍射光场的探测[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 686-689.
- [12] Wang Y, Fang E Z. Underwater acoustic detection utilizing laser luminous flux variation method [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 33(1): 69-73.  
王燕, 方尔正. 激光通量变化法探测水下声信号[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 69-73.
- [13] 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.
- [14] Zhang J, Wang Q E, Qi H X. Coherent detection and simulation of the vibration characteristics of underwater acoustic signal [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(4): 449-453.  
张骏, 王庆娥, 亓洪兴. 水下声信号激光相干探测的仿真与实验[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(4): 449-453.
- [15] Zhang X L, Mao H J, Li K, et al. Amplitude detection of low frequency water surface acoustic wave based on phase demodulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 0506001.  
张晓琳, 毛红杰, 李凯, 等. 相位解调实现低频水表面声波振幅探测[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 0506001.
- [16] Zhang L S, Zhang X L, Liu G, et al. Measurement for the characteristic parameters of the water surface acoustic wave induced by underwater acoustic radiation [J]. Acta Acustica, 2019, 44(2): 201-208.  
张烈山, 张晓琳, 刘刚, 等. 水下声辐射激励水表面声波的特征参数测量[J]. 声学学报, 2019, 44(2): 201-208.
- [17] Cao Z H, Zheng T T, Sun T F, et al. Experiment research on underwater acoustic signal for laser detection [J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(2): 17-21.  
曹增辉, 郑田甜, 孙腾飞, 等. 激光探测水下声信号实验研究[J]. 光电技术应用, 2014, 29(2): 17-21.
- [18] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.  
陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.
- [19] Dai Z H, Sun J Z, Sui P F. Theoretical study on the water surface transversal mini-wave due to the underwater sound field [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(1): 95-98.  
戴振宏, 孙金祚, 隋鹏飞. 水下声源引起的水表面横向微波的理论研究[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(1): 95-98.
- [20] Zhang X L, Tang W Y, Sun H Y. Frequency identification of underwater acoustic signals based on Morlet wavelet [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(12): 1839-1841.  
张晓琳, 唐文彦, 孙和义. 基于 Morlet 小波的水下声信号频率识别[J]. 光电子·激光, 2010, 21(12): 1839-1841.