

·激光技术·

## 激光探测水下声信号的实验研究

曹增辉, 郑田甜, 孙腾飞, 杨宝磊, 李丹, 张骏

(烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

**摘要:**在实验室条件下,对于不同频率、不同振动强度的水下声音信号展开激光相干探测研究,建立了基于该方法的实验系统。水表面在水下声音信号作用下产生波动时,用激光照射水表面,其产生的水表面散射光携带了声波信息并与参考光发生干涉,对干涉信号进行采集并处理可得到水下声信号的频率与强度信息。对不同条件下得到的实验结果进行对比分析。实验结果表明,激光相干探测技术可有效地探测水下声信号,并且随着声信号的频率提高、强度减弱,探测效果趋于变差。实验系统采用全光纤光路设计,取得了较好的效果。

**关键词:**水下声信号;激光干涉;频率探测;光纤光路

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-02-0017-05

## Experiment Research on Underwater Acoustic Signal for Laser Detection

CAO Zeng-hui, ZHENG Tian-tian, SUN Teng-fei, YANG Bao-lei, LI Dan, ZHANG Jun

(Institute of Science and Technology for Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract:** A research on laser coherent detection is developed to detect underwater acoustic signals in different frequencies and vibration intensities under laboratory conditions. And an experiment system is established based on the research. A beam of laser is irradiated water surface when the water surface is fluctuated by underwater acoustic signals. The generated scattering light with acoustic wave information will interfere with reference light. Interference signals are collected and processed to obtain the frequency and intensity information of underwater acoustic signals. Experimental results obtained under different conditions are compared and analyzed. The results show that underwater acoustic signal can be detected effectively with laser interference detection technology. And detection effects become weaker with the increasing of frequency and the weakening intensity of signals. Full fiber path design is used in the experimental system and better effect is got.

**Key words:** underwater acoustic signal; laser interference; frequency detection; fiber optical path

随着社会的发展,人类对于海洋的开发越来越重视<sup>[1]</sup>。在民用领域,尤其在捕捞业,准确探测到水下的鱼群对于提高捕捞效率非常重要。在军事领域,对于水下目标的准确探测,如对于敌方水下舰艇进行准确、快速的定位对于取得战场主动权有着重要的意义<sup>[2-4]</sup>。近些年,随着光电、激光技术的发展,水下探测技术有了长足的进步<sup>[5]</sup>,特别是利用激光干涉测量进行水下探测,其具有机动性好、能远距

离、快速、准确的对水下目标进行探测的特点,已成为未来水下探测的主要发展方向。

近些年,已有一些利用激光干涉原理进行水下声信号探测的实验研究,但在光路设计中都采用了传统光路设计,存在光路调节难度大,易受环境因素干扰等缺点<sup>[6]</sup>。随着光纤通信技术的发展,越来越多的实验研究中采用了光纤光路设计。光纤用于光路设计能提高光信号的传输效率,大大简化实验系

收稿日期:2014-01-21

基金项目:国家自然科学基金(60277023);山东省自然科学基金资助项目(ZR2011FM007)

作者简介:曹增辉(1987-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事水下声信号的激光相干探测的研究。

统,并且提高了抗外界干扰能力。因此在激光相干探测水下声信号的实验系统中,选择采用光纤光路系统。

## 1 探测原理

通常所要探测的水下目标,其振动频率都是恒定的。当水下存在发声源时,声源的振动通过水体传导将引起水表面的振动,而且只有与振动源频率相同的水表面波才具有显著的振幅<sup>[7]</sup>。可以认为,水下声源引起的水表面微波的振动频率等于声源的频率,从水表面波探测水下声源是可行的。这一理论<sup>[8]</sup>已经在戴振宏等人的相关论文做过详细的探讨,这里不再赘述。

对于实验中由水下扬声器引起的水表面波动可以认为是简谐振动,其表面的速度是随着振动频率做周期性变化,检测到水表面的振动波形,然后对其进行频率解调,再做频谱分析,即可得到水表面的振动频率<sup>[9]</sup>。

考虑当水下声源不存在时的自然水表面波动,此时的水表面波为多个正弦信号的叠加,每个正弦波的表达式如下

$$F(t) = H \sin(2\pi f t + \phi) \quad (1)$$

式中, $H$ 、 $f$ 、 $\phi$ 分别表示自然水表面的振幅、频率和相位。

则可以把水面波表达为

$$F_n(t) = \sum_n (H_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n)) \quad (2)$$

用激光照射处于波动状态的水面,则会产生携带水中声波信息的散射光,散射光又与参考光发生干涉<sup>[10]</sup>,在它们的作用下,探测光的光程差发生了改变,其光强信息可以表示为

$$I = I_a + I_b + 2\sqrt{I_a I_b} \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[2(S_a - S_b) + 2\sum_n (H_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n)) + 2H_n \sin(2\pi f_s t + \phi_s)]\right\} \quad (3)$$

式中, $I_a$ 、 $I_b$ 为两相干光的光强, $\lambda$ 为所用探测光波波长, $(S_a - S_b)$ 为初始条件下水面散射光与参考光的初始光程差。令

$$\begin{cases} \phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \left\{ (S_a - S_b) + \sum_n [H_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n)] \right\} \\ M = \frac{4\pi A_s}{\lambda} \\ \phi_s = 0 \end{cases} \quad (4)$$

并利用余弦两角和的公式<sup>[11]</sup>将式(3)展开,光信号经光电接收器被转变成电信号,得到的交流光

电信号的表达式为

$$V = V_0 \left\{ \cos \phi_0 \cos [M \sin(2\pi f_s t)] - \sin \phi_0 \sin [M \sin(2\pi f_s t)] \right\} \quad (5)$$

式中, $V_0$ 是交流光电信号的幅值。

将式(5)展开,将其表示乘以振动频率 $f_s$ 为基频的各次谐波项之和的形式为

$$V = V_0 [J_0(M) \cos \phi_0 - J_1(M) \sin \phi_0 \sin(2\pi f_s t) + 2J_2(M) \cos \phi_0 \cos(2\pi \times 2f_s t) - 3J_3(M) \sin \phi_0 \sin(2\pi \times 3f_s t) + 4J_4(M) \cos \phi_0 \cos(2\pi \times 4f_s t) - \dots] \quad (6)$$

式中, $J_n(M)$ 为第一类的 $n$ 阶贝塞尔数。展开过程中应用了式(7),式(8)。

$$\cos [M \sin(2\pi f_s t)] = J_0(M) + 2J_2(M) \cos(2\pi \times 2f_s t) + 2J_4(M) \cos(2\pi \times 4f_s t) + \dots \quad (7)$$

$$\sin [M \sin(2\pi f_s t)] = J_1 \sin(2\pi f_s t) + 2J_3(M) \sin(2\pi \times 3f_s t) + 2J_5(M) \sin(2\pi \times 5f_s t) \cdot \dots \quad (8)$$

分析可知,实验中干涉信号中包含以水下声信号振动频率 $f_s$ 为基频的各次谐波项之和<sup>[12]</sup>。

受到自然波动的水表面波的影响,实验所得到的时域信号中出现了 $\cos \phi_0$ 或 $\sin \phi_0$ 的乘积项。根据傅里叶变换的频移特性,时间信号 $f(t)$ 增加 $\cos(\omega_0 t)$ 或 $\sin(\omega_0 t)$ 的乘积项,则其表现在频率轴上改变则为向左或向右平移 $\omega_0$ ,所以试验所得到的信号频谱图是以信号频率为中心频率的频谱带。

## 2 系统设计

在实验室建立了采用此种原理来探测水下声信号的实验装置,系统采用零差工作模式,如图1所示。实验装置主要包括信号发生器光学气垫隔离平台、激光光源、信号发生器、功率放大器、光纤、三端光纤环行器、光纤合束器、光纤滤波器、数字示波器、水底扬声器、计算机。试验中激光器输出激光进入光纤环行器,其作用能有效防止光纤接口的反射光进入到激光器进而对激光器造成损伤,经过环行器后激光在光纤端面分成反射光与透射光,反射光是相干探测的参考光,透射光则经过光纤滤波器后进入固定在水面上方的聚焦透镜,通过透镜聚集到所要探测的水表面上,水表面的反射光中携带了表面振动的频率信息,发射光又经过透镜被光纤环行器的同一端口接收为相干探测的信号光,信号光与参考光在光纤内发生干涉,相干光进入到探测器,利用

GPIB 接口总线通过编程将实验信号数据读取并传输到计算机,通过解调与快速傅里叶变换处理后便可以分析出水表面的振动频率。实验中,所用信号发生器为 TFG2050 DDS 函数信号发生器,激光器采用上海拜安科技有限公司 DS3200 系列的台式激光

器,数字示波器采用 Tektronix 公司的 TDS3052 双通道数字荧光示波器,光纤采用的 1 550 nm 的 G652 单模光纤。函数信号发生器产生信号,经功率放大器放大作用于水下的扬声器,并且通过连接的示波器实时监测。

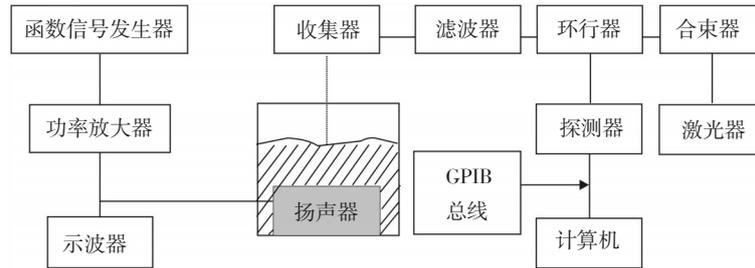


图 1 实验装置示意图

### 3 实验结果

用图 1 所示的实验系统进行试验,当水下扬声器不发声时,探测结果如图 2 所示。

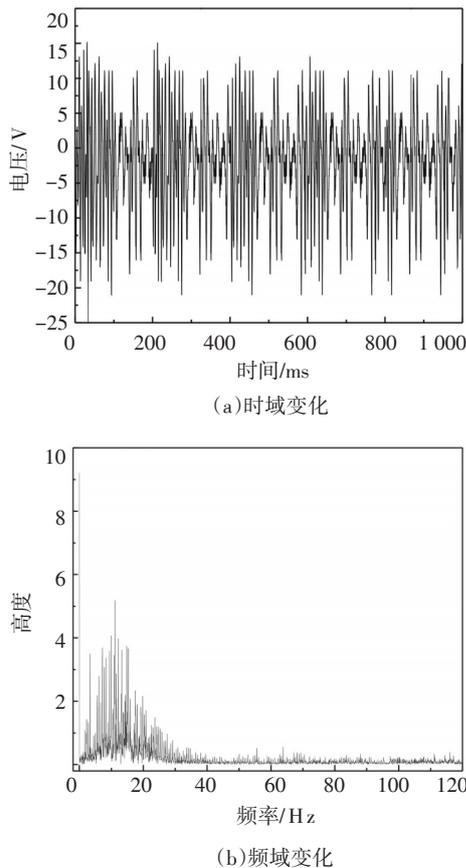
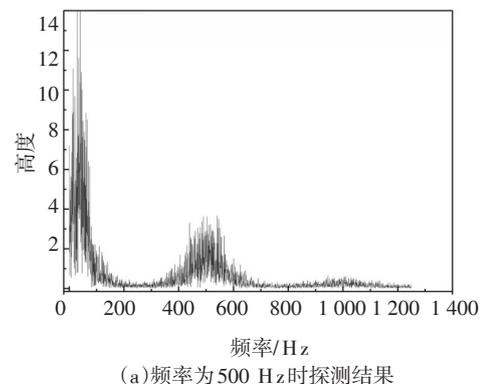


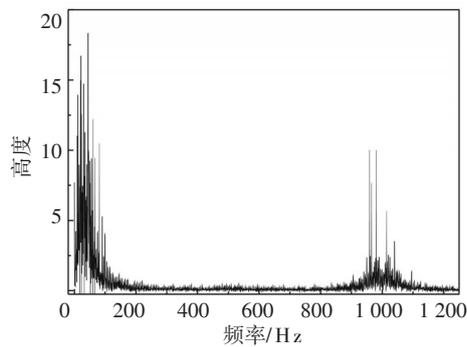
图 2 激光相干探测的实验结果

可以从频域图中得到水下声源不发声时,水表面自然波动的频率主要在 12 Hz 左右,介于 6~25 Hz 之间。再对时域图进行分析,为了便于描述,将水表面波振动位移最大时,即速度为零、速度方向发生改变的时刻在干涉光强信号图中对应的位置定义为辨向点<sup>[13]</sup>。通过对于时域图中的辨向点之间的间隔时间进行统计,可得由其时域图可以得到大多数相邻辨向点之间的时间间隔在 20~60 ms 之间,按照相邻辨向点与波动频率的换算公式可得出水表面波的频率介于 9~25 Hz 之间,这与由傅里叶变换得到的频域图<sup>[14]</sup>中的频率分布是相符合的,从而进一步验证了探测结果的正确性。

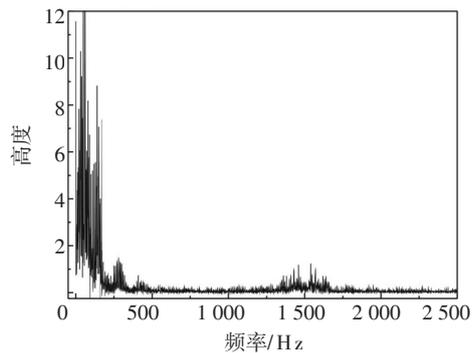
图 3 为水下声源固定于水下 10 cm 处,发生频率分别为 500 Hz、1 000 Hz、1 500 Hz、3 000 Hz 时探测结果。从图 3 中可以看出,四种频率的水下声源振动均可准确的探测。但随着信号频率的增加,所探测到的信号强度是逐渐降低。



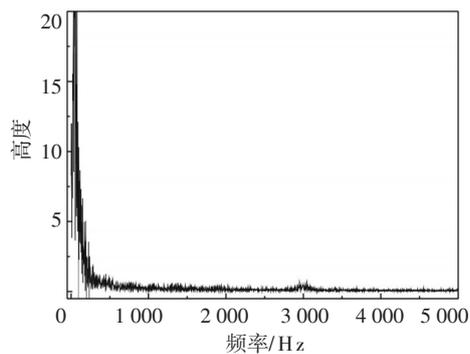
(a) 频率为 500 Hz 时探测结果



(b) 频率为 1 000 Hz 时探测结果



(c) 频率为 1 500 Hz 时探测结果



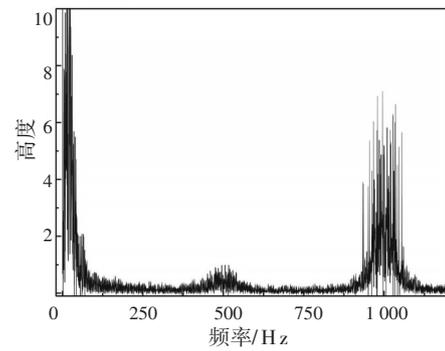
(d) 频率为 3 000 Hz 时探测结果

图3 频率分别为 500 Hz、1 000 Hz、1 500 Hz、3 000 Hz 时探测结果

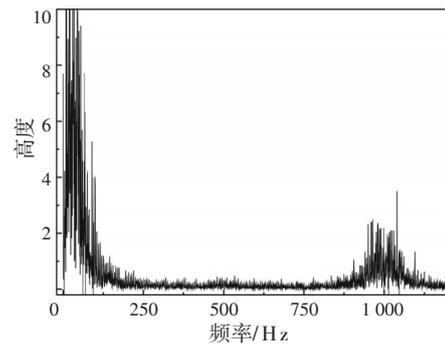
图4为水下声源发生频率设定为 1 000 Hz,其位于水中的深度分别为 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 时探测结果。从图4中可以看出,四种深度的水下声源振动频率能准确地探测。但随着声源的深度增加,信号波峰逐渐变低,说明随着水下声源深度的增加由它引起的水表面波动的振幅随之减小。

#### 4 结论

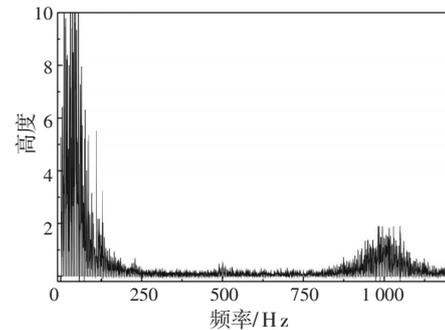
在实验室条件下,基于激光干涉原理对不同振动频率、振动强度的水下声信号进行探测研究,建



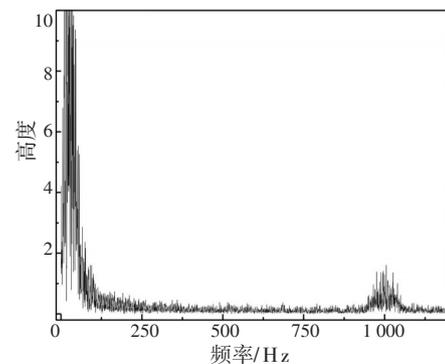
(a) 水下深度为 5 cm 时探测结果



(b) 水下深度为 10 cm 时探测结果



(c) 水下深度为 15 cm 时探测结果



(d) 水下深度为 20 cm 时探测结果

图4 声源频率为 1 000 Hz,水下深度分别为 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 时探测结果

立了相应的实验系统。通过改变声源的深度以及振动强度,研究了水下声信号的振动频率以及声信

号强度对探测的影响。对声源处于固定深度时的四种不同频率以及声源设定固定频率时处于四种不同深度所得到的实验结果进行时频变换处理。此外,对无水下声信号的水表面自然波动进行了探测,并与理论分析相结合,验证了探测结果的准确性、有效性。实验结果表明,激光相干探测技术可有效地探测水下声信号,并且在声信号的频率较低、信号强度较高时,探测效果较好。本实验系统采用光纤光路代替以往的传统光路,大大降低了实验系统的调节难度,提高了系统的抗干扰能力,取得了较好的实验效果。

### 参考文献

- [1] 段海鹏. 基于激光干涉原理的水下声信号频率测试技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [2] 林玉池,崔彦平,黄银国.复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3):509.
- [3] 现代潜艇技术及发展[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1999.
- [4] 李汉清,戴修亮.美国海军正在发展的水下探测系统[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2004(4):37-38.
- [5] 张晓琳,唐文彦,孙和义.水下声信号的激光干涉测量[J]. 光学精密工程,2010,18(4):809-815.
- [6] 刘伟,张骏.水下声场激光相干探测的实验研究[J]. 光电技术,2013,33(2):141-144.
- [7] 伊厚会,孙金祚.利用激光探测水下声场的理论研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版),2003,16(4):252-255.
- [8] 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.
- [9] 贺岩,王文奎,夏文兵,等.激光多普勒振动计用于水下声光通信[J]. 中国激光,2007,34(5):703-706.
- [10] Antonelli L, Kirsteins I. Empirical acousto-optic sonar performance versus water surface condition[C]//OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. IEEE, 2001, 3: 1546-1552.
- [11] 臧立本.两角和与差的余弦公式教学实录与反思[J]. 中学数学月刊,2010(4):5-7.
- [12] Barik T K, Roy A, Kar S. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves [J]. American journal of physics, 2005, 73(8): 725-729.
- [13] Blackmon F A, Antonelli L T. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air, acousto-optic sensor [J]. Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 2006, 31(1): 179-187.
- [14] 张晓琳.基于激光干涉的水表面声波探测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

(上接第9页)

数,可以利用相同的试验方法评估不同热像仪在不同条件下的透雾探测能力。目前,由于红外热成像引导系统的成本高昂,除了少数高端和特种车辆,其在民用车辆上的应用还比较少,但近几年,随着红外热像仪核心组件国产化能力的提高,成本已经开始逐渐下降,由于其具有良好的透雾特性,因此车载红外引导系统将逐渐在智能交通领域得到更多应用。

### 参考文献

- [1] 张利,汪林.不利气象条件对公路交通安全的影响及对策[J]. 公路交通科技,2011,28(S1):120-123.
- [2] 邢素霞,陈天华,李婧娴.基于图像融合的驾驶员视觉增强技术[J]. 公路交通科技,2010,27(8):131-135.
- [3] 科洛勃罗多夫·B·T,舒斯特·N.红外热成像[M]. 航天工业总公司第三研究院三部、八三五八所联合翻译出版,1994.
- [4] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [5] 彭德权,周成平,丁明跃. 海空背景长波红外大气透过率的仿真计算方法[J]. 红外与激光工程,2001,32(2):112-117.
- [6] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. 光学精密工程,1998,6(4):35-42.
- [7] Richard D, Hudson JR. Infrared System Engineering [M]. New York: John Wiley&Sons, INC, 1969.
- [8] 陈兵,李澄俊. 水雾的红外衰减性能实验与分析[J]. 光电工程,2008,35(3):48-52.
- [9] 毛峡,董旭阳,刁伟鹤. 巡航导弹红外辐射及大气衰减计算模型[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(8):952-955.
- [10] 尚倩,李子华. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. 环境科学,2011,32(9):2750-2760.