

# 激光空中探测水下目标的新方法研究

张晓琳,唐文彦,马 强

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为了实现在空中利用激光技术对水下目标进行探测的目的,基于迈克尔逊干涉仪的基本原理,提出了一种从水面散射激光中获取水下声源信息的新方法。设计并实现了一套空中探测水下声信号的实验装置。实验结果表明:频谱分析图中的峰值频率即为水下声源的发声频率,系统能够实时探测发声频率在 1 kHz ~ 14 kHz 的水下声源,且测量标准偏差小于 7 Hz。该方法为航空遥感水下目标提供了一条新的技术途径。

**关键词:**激光技术;激光探测;干涉;水下声信号

**中图分类号:**TB561      **文献标识码:**A

## Study on a new method using remote laser to detect underwater objects

ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, MA Qiang

(Harbin Institute of Technology, School of Electrical Engineering & Automation, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new method has been developed to detect real-time underwater acoustic signals with laser and a corresponding test system has been built. The experiment results prove that the method can be used to detect real-time underwater acoustic signals with a frequency between 1 kHz to 14 kHz. This test system consists of an underwater acoustic source, a precise optical detection device, and data acquisition and processing components. When the underwater acoustic source generates sound causing fluctuation of the water surface, let laser beams irradiate the water interface from air, and the scattered light will carry frequency information of the acoustic waves. The precise optical detection device adopting basic principle of Michelson interferometer can detect change of optical path difference caused by the water surface fluctuation, and achieve real-time information concerning audible frequency of the underwater acoustic source in the data processing system by means of demodulation. This completely innovative method provides a novel technical solution for aerial remote sensing of underwater objects.

**Key words:** laser technique; laser detection; interference; underwater acoustic signals

### 1 引言

海洋深处敌方潜艇是威胁我方水面舰船执行任务时最大的敌人,如何实现准确、快速和有效的反潜探测就成为当前一个重大的课题。自 20 世纪 80 年代以来,随着电子、通信、计算机以及传感器等高新技术的快速发展,极大地促进了信息获取的实时性、深度和广度,使得水下目标探测技术有了长足的发展。目前,船载声纳技术占水下探测的主导,但由于不能机载,所以难以实现机动灵活的大范围快速探

潜<sup>[1]</sup>。蓝绿激光雷达海洋探测方法具有速度快、搜索范围大的优点,但由于探测的水深受到限制且很大程度依赖于海水的清洁度<sup>[2]</sup>,所以难以满足军事上的实战要求。激光声遥感技术的研究始见于 Tulane 大学 M. S. Lee 的文章<sup>[3]</sup>,在空中利用激光探

作者简介:张晓琳(1976-),女,博士研究生,主要从事空中探测水下目标的信息感知技术方面的研究。E-mail: zhangxiaolin@hit.edu.cn

收稿日期:2009-02-10

测,水下利用声波传递信息,两者有机结合起来,可以远距离、非接触地实现空中平台上探测水下发声目标,在未来的海洋探测中具有巨大的应用前景<sup>[4]</sup>。本文基于迈克尔逊干涉仪的基本原理,设计并实现了一套激光空中探测水下声源的实验系统,从水表面的散射光与参考光的干涉信号中解调出了水下声源的发声频率。

## 2 探测原理

潜艇等水下目标的无线通信主要使用声波作为通信手段<sup>[5]</sup>,同时,潜艇也存在着机械振动噪声、螺旋桨噪声以及水动力噪声等<sup>[6]</sup>。当水下存在声源时,将引起水表面波动,烟台大学戴振宏、孙金祚等人进行了理论探讨<sup>[7-8]</sup>,将普遍的流体力学方程线性化,推导出了水表面波的色散关系以及波传播形式,得到如下的结论:水下声源在水表面激起的微波,其振动频率等于声源的频率。

当水下声源引起水表面波动时,我们用激光照射波动的水面,则散射光中携带了声波信息,令其与参考光干涉,光程差随着水表面波的振幅发生变化,我们从干涉信号中可以解调出水下声源的频率。

为不失一般性,假定水下有一振动频率 $f_s$ 的声源,其发声时在水表面引起的水表面波用 $A_s \sin(2\pi f_s t + \varphi_s)$ 来表示。一个有限大小、具有多种频率的水下声源在水表面引起的水表面波,只是在此基础进行的积分或叠加。那么,按照我们的探测原理,信号光与参考光干涉后的光强信息用式(1)来表示:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} [(L_1 - L_2) + A_s \sin(2\pi f_s t + \varphi_s)] \right\} \quad (1)$$

其中, $I_1, I_2$ 为两相干光的光强; $\lambda$ 为光波波长; $(L_1 - L_2)$ 为水面静止时信号光与参考光的初始光程差。

我们令 $\varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda}(L_1 - L_2)$ , $X = \frac{4\pi A_s}{\lambda}$ , $\varphi_s = 0$ ,并将式(1)按照余弦两角和的公式展开,当光强信号被光电接收器接收后,得到的交流光电信号的表达式如式(2)所示:

$$U = U_0 \{ \cos \varphi_0 \cos [X \sin(2\pi f_s t)] - \sin \varphi_0 \sin [X \sin(2\pi f_s t)] \} \quad (2)$$

利用公式(3)和式(4)可以将式(2)展成以振动频率 $f_s$ 为基频的各次谐波项之和。

$$\cos [X \sin(2\pi f_s t)] = J_0(X) + 2J_2(X) \cdot \cos(2\pi \times 2f_s t) + 2J_4(X) \cos(2\pi \times 4f_s t) + \dots \quad (3)$$

$$\sin [X \sin(2\pi f_s t)] = J_1(X) \sin(2\pi f_s t) + 2J_3(X) \cdot \sin(2\pi \times 3f_s t) + 2J_5(X) \sin(2\pi \times 5f_s t) \dots \quad (4)$$

其中, $J_n(X)$ 为第一类的 $n$ 阶贝塞尔函数。

干涉信号中包含以振动频率 $f_s$ 为基频的各次谐波项之和,我们对检测的波形做频率解调和频谱分析,即可获得水表面的振动频率,也即水下声源的频率信息。

## 3 系统设计

系统利用迈克尔逊干涉仪的基本原理,目的是验证激光空中探测水下声信号的可行性,实验系统如图1所示。

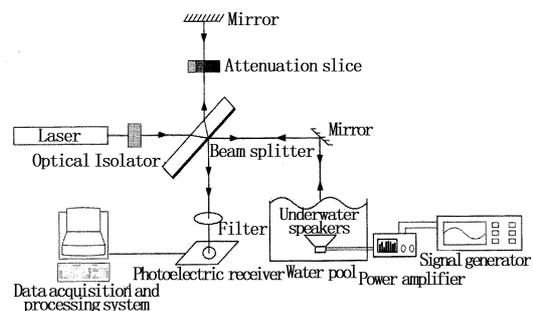


图1 实验系统的组成

系统的主要器件技术指标如表1所示。

表1 系统主要部件的性能指标

| Device                               | Parameter                   | Value           |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Stabilized Helium Neon Laser Systems | Wavelength/nm               | 632.8           |
|                                      | Output power/mW             | 0.6 ~ 1.4       |
|                                      | Beam diameter( $1/e^2$ )/mm | 0.54            |
|                                      | Polarization(Linear)        | > 5000:1        |
| Underwater speakers                  | Impedance/ $\Omega$         | 8               |
|                                      | Power/W                     | 15              |
|                                      | frequency range/Hz          | 100 ~ 15000     |
| Optical Isolator                     | Transmittance               | > 97%           |
| Filter                               | Band width/nm               | 1               |
|                                      | Wavelength/nm               | 400 ~ 1070      |
|                                      | Type                        | Silicon         |
|                                      | Diam./mm                    | 8               |
| Large-Area Photoreceivers            | Gain/(V/A)                  | $2 \times 10^6$ |
|                                      | Band width/KHz              | 90              |
| A/D                                  | Sample rate/KHz             | 44              |

系统主要由信号发生器、功率放大器、水下扬声器、氦氖激光器、光隔离器、分光镜、衰减片、反射镜、滤光片、光电探测器等组成。信号发生器产生的标准正弦信号传递给功放,功放驱动水下扬声器发声作为水下声源。激光器采用 He - Ne 稳频激光器,输出激光进入光隔离器,有效阻止反射光返回激光

器而影响其稳定性。经过分光镜的激光分为反射光和透射光,反射光作为相干检测的参考光,透射光经45°放置的反射镜射向被测水表面。水表面由于水下扬声器发声而上下波动,使得光程差发生改变,信号光和参考光发生干涉后经过滤波片照射到光电探测器,直接检测相干信号。检测到的相干信号由数据采集卡记录,经过滤波等处理后进行快速傅里叶变换,可以获得水下声源的振动频率。

4 实验结果

按照图1的实验装置,信号发生器给出频率为1 kHz~14 kHz的标准正弦信号,通过功放驱动水池中吊装的水下扬声器发声,光学平台上搭建的干涉光路探测水表面振动导致的光程差变化。实验目的是证明探测到的水下声源的发声频率和信号发生器设置的正弦信号频率的一致性,从而验证激光空中探测水下目标新方法的可行性。

图2是当水下声源频率为2 kHz时水面运动的相干检测波形。可以看出整体的明暗相间变化的干涉条纹是由自然水面起伏引起的,在干涉条纹上的载波,也即短时间尺度的高频相位变化是由水下声源的振动引起的,我们对图2的数据进行滤波等处理后再做傅里叶变换,得到图3所示的频谱分析图。频谱分析图的峰值频率为2003 Hz,与水下扬声器的发声频率2 kHz近相差3 Hz,基本一致。在4 kHz,6 kHz,8 kHz,10 kHz,12 kHz等处附近依次出现幅度逐渐减小的频率尖峰,这与探测原理中指出的可以把交流光电信号表达式以振动频率为基频的各次谐波项之和展开的结论相符合,验证了探测理论的正确性。

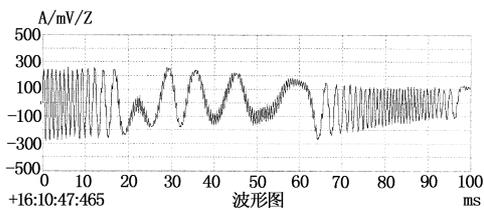


图2 水下声源频率为2 kHz的干涉信号时域图

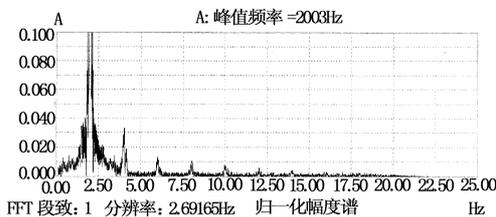


图3 水下声源频率为2 kHz的干涉信号频谱分析图

为了验证测量得到的峰值频率和水下扬声器发声频率的一致性,进行了多组比对实验。①信号发

生器给出频率范围为1 kHz~14 kHz,频率间隔1 kHz,测量到的数据如表2所示。②信号发生器给出频率范围为7.5 kHz~8.5 kHz,频率间隔100 Hz,测量到的数据如表3所示。从多次实验结果可以看出,频谱分析图中的峰值频率与声源频率基本一致,最大标准偏差小于7 Hz。

表2 频谱分析图峰值频率数据 I

| 水下扬声器<br>发声频率/kHz | 频谱分析图峰值频率/kHz |        |        | 标准偏差<br>Hz |
|-------------------|---------------|--------|--------|------------|
|                   | 1             | 2      | 3      |            |
| 1.000             | 1.005         | 0.996  | 1.001  | 4.5        |
| 2.000             | 2.003         | 1.998  | 2.006  | 4.0        |
| 3.000             | 2.998         | 3.004  | 2.999  | 3.2        |
| 4.000             | 4.007         | 4.000  | 4.003  | 3.5        |
| 5.000             | 5.000         | 4.997  | 5.004  | 3.5        |
| 6.000             | 5.994         | 6.005  | 5.994  | 6.4        |
| 7.000             | 6.998         | 7.004  | 6.993  | 5.5        |
| 8.000             | 8.001         | 7.993  | 8.005  | 6.1        |
| 9.000             | 9.006         | 8.999  | 9.000  | 3.8        |
| 10.000            | 9.999         | 10.002 | 9.994  | 4.0        |
| 11.000            | 11.000        | 10.996 | 11.003 | 3.5        |
| 12.000            | 12.002        | 11.994 | 12.001 | 4.4        |
| 13.000            | 13.007        | 12.997 | 13.004 | 5.1        |
| 14.000            | 13.995        | 14.002 | 13.993 | 4.7        |

表3 频谱分析图峰值频率数据 II

| 水下扬声器<br>发声频率/kHz | 频谱分析图峰值频率/kHz |       |       | 标准偏差<br>Hz |
|-------------------|---------------|-------|-------|------------|
|                   | 1             | 2     | 3     |            |
| 7.500             | 7.507         | 7.498 | 7.500 | 4.7        |
| 7.600             | 7.600         | 7.604 | 7.602 | 2.0        |
| 7.700             | 7.699         | 7.703 | 7.705 | 3.1        |
| 7.800             | 7.803         | 7.797 | 7.805 | 4.2        |
| 7.900             | 7.907         | 7.902 | 7.894 | 6.6        |
| 8.000             | 8.002         | 8.006 | 7.999 | 3.5        |
| 8.100             | 8.096         | 8.100 | 8.103 | 3.5        |
| 8.200             | 8.202         | 8.200 | 8.208 | 4.2        |
| 8.300             | 8.294         | 8.298 | 8.300 | 3.1        |
| 8.400             | 8.403         | 8.401 | 8.407 | 3.1        |
| 8.500             | 8.500         | 8.492 | 8.501 | 4.9        |

如果我们从时域波形中选出水面起伏运动速度较慢的短时间测量数据来分析,也可以验证探测理论的正确性。图4是水下扬声器发生频率为6 kHz时采集到的干涉信号,图中由快到慢再到快的相位变化是由自然水面起伏引起的,频率为15 Hz左右。

短时间尺度的高频相位变化则是由水下声源的振动引起的,分别选取图4中圈出的1,2,3,4,5,6点处附近的数据进行快速傅里叶变换,得到图5所示的结果。可见,1~6组每组图谱的峰值频率都为6 kHz,与水下扬声器发生频率相吻合;在6 kHz的2倍频处(12 kHz)也出现明显尖峰,这验证了探测原理中把干涉信号展开成以振动频率 $f_s$ 为基频的各次谐波项之和的结论。我们令信号发生器给出1 kHz~14 kHz之间的任意频率值,都得到了类似的结论。

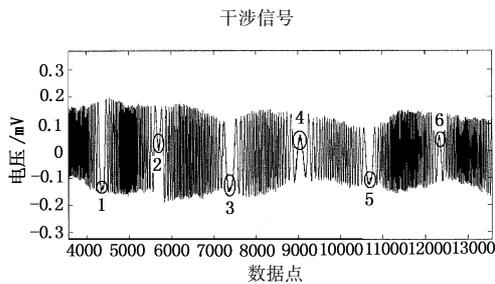


图4 水下声源频率为6 kHz的干涉信号波形

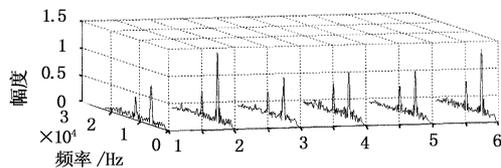


图5 局部数据频谱分析图

## 5 结论

研究了一种用激光照射水面,从其散射激光中获取水面声波信息的新方法,从而达到在空中利用激光技术对水下目标进行探测的目的。实验表明,应用迈克尔逊干涉仪的基本原理搭建的测量水表面波的系统,能够准确探测到1 kHz~14 kHz之间的水下声源发出的声波频率。频谱分析图中的峰值频率与水下声源频率基本一致,最大标准偏差小于

7 Hz。激光干涉法探测水下声信号的研究可以为探测技术提供新思路。

## 参考文献:

- [1] Li Qihu. Sonar technology of 21st century [J]. Physics, 2006, 35(5):402-407. (in Chinese)
- [2] Yang Huayong, Liang Yonghui. The present and future developing trend of airborne blue-green laser systems for searching underwater objects [J]. Optics Mechanics & Electronics Information, 2003, 12(12):6-10. (in Chinese)
- [3] Lee M S, Bourgeois B S, Hsieh S T, et al. A laser sensing scheme for detection of Underwater Acoustic signals [C]//Conference Proceedings 1998 IEEE, South Knoxville, USA, 1988:253-257.
- [4] Shang Jianhua, He Yan, Chen Weibiao. Laser sonar detecting technology [J]. Laser & Optoelectronics progress, 2008, 45(2):59-63. (in Chinese)
- [5] He Yan, Wang Wenkui, Xia Wenbing, et al. Laser Doppler vibrometer for acousto-optic communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(5):703-706. (in Chinese)
- [6] Wang Lei, Chang Shugang. Submarine noises and the application of synthetically reduce the noises technology [J]. Marine Technology, 2007(2):44-48. (in Chinese)
- [7] Dai Zhenhong, Sun Jinzuo, Sui Pengfei. Study on the theory of one-dimensional model for horizontal mini-waves on water surface [J]. Journal of Yantai University: Natural Science and Engineering Edition, 2003:23-28. (in Chinese)
- [8] Dai Zhenhong, Sun Jinzuo. 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. (in Chinese)