

# 水下声信号激光相干探测的仿真与实验

张 骏<sup>1</sup>, 王庆娥<sup>1</sup>, 亓洪兴<sup>2</sup>

(1. 烟台大学 光电信息学院, 山东 烟台 264005;

2. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

**摘要:**建立波长 1 550 nm 的全光纤激光相干探测系统, 系统采用全光纤设计, 光路简单且稳定性高. 数值仿真与实验结果表明, 采用激光相干探测和时-频分析, 可有效地提取水下不同频率、不同强度和不同深度的振动特征. 该系统可实时探测出 40 ~ 10 000 Hz 的水下声信号, 且测量标准偏差小于几个赫兹. 因此, 激光相干雷达用于水下目标的探测与识别具有实时性, 该技术可为水下目标的特征提取和识别提供新的途径.

**关键词:**激光; 水下声信号; 相干探测; 特征提取

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

## Coherent detection and simulation of the vibration characteristics of underwater acoustic signal

ZHANG Jun<sup>1</sup>, WANG Qing-E<sup>1</sup>, QI Hong-Xin<sup>2</sup>

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

2. Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** A laser coherent detection system with wavelength of 1 550 nm was established. The stability of the system has been improved because of the all-fiber optical path. The underwater vibration signals with different frequency, intensity and depth have been studied in experiments. The results show that the fluctuations of water surface are detected by the laser coherent detection system. The vibration characteristics of the underwater acoustic field can be extracted effectively by the time-frequency analyses. Experimental results indicate that the detection system can be used to detect real-time underwater acoustic signals at frequency from 40 Hz to 10000 Hz with test error less than a few Hz. Therefore the laser coherent radar can be used for feature extraction and recognition of underwater target in real time.

**Key words:** laser, underwater acoustic signal, coherent detection, feature extraction

**PACS:** 42.55-f, \*43.30-k

## 引言

在海洋资源的开发和军事应用上, 水下目标的探测与识别都是海洋研究的重要内容. 利用激光进行水下探测, 具有机动性好、距离远、快速、准确的特点, 已成为未来水下探测的主要发展方向<sup>[1-5]</sup>.

传统的干涉仪采用镜片结构, 对光学器件表面质量和光路校准要求很高, 采用这套系统来探测水

表面特征, 存在光路调节难度大, 易受环境因素干扰等困难. 为了提高系统的稳定性和简化光路, 全光纤的光束传输和相干, 既能简化光路, 又能降低对光学器件表面质量和光路校准的要求. 另外, 使用的光纤器件均为光纤通讯的商品化器件, 不仅质量有保证, 而且成本也得到了降低. 因此在探测水下声信号的研究中, 我们将采用全光纤光路的激光相干探测系统.

收稿日期: 2015-10-12, 修回日期: 2016-04-01

Received date: 2015-10-12, revised date: 2016-04-01

基金项目: 中国科学院空间主动光电技术重点实验室基金资助

Foundation items: Supported by Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Chinese Academy of Sciences

作者简介 (Biography): 张 骏 (1965-), 男, 博士/教授, 主要从事激光探测技术的研究. E-mail: jzhang@ytu.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: qhx@mail.sitp.ac.cn

本文建立了一套全光纤光路、工作波长 1 550 nm 的激光相干探测实验系统,采用激光微多普勒效应<sup>[6-12]</sup>和相干探测方式,对不同实验条件下水下振源振动所引起水表面产生的表面波动信号进行探测与分析.实验结果表明:该系统能较好的获取 40 ~ 10 000 Hz 的振动信息.

## 1 实验原理

研究表明<sup>[13-14]</sup>:水下声源引起的水表面微波的振动频率等于声源的频率.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.

平静的水表面有自然波动,水表面波可视为多个正弦信号的叠加,即

$$Y_n(t) = \sum_n (A_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n)) , \quad (1)$$

式中  $A_n$ 、 $f_n$  和  $\phi_n$  分别表示自然水表面的振幅、频率和相位.

当激光照射在水表面时,平静、自然波动的水表面会产生散射光,散射光与参考光发生相干<sup>[4]</sup>,其光强为:

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

式中  $I_a$ 、 $I_b$  为两相干光的光强, $\lambda$  为激光波长,  $(S_a - S_b)$  为初始条件下水面散射光与参考光的初始光程差,  $f_n$  为水表面自然波动频率和  $f_s$  水下振源的振动频率.因此利用激光微多普勒效应<sup>[6-12]</sup>,采用相干探测方式,可以提取水下扬声器振动所引起水表面的特征.

## 2 数值仿真

设平静水表面自然波动的振幅为  $A_n = 1 500$  nm,频率为  $f_n = 15$  Hz,初相位  $\phi_n = 0$ ,仿真结果与频谱分析如图 1(a)和图 1(b)所示:其左侧可见一个频带,其宽度等于最大多普勒频移,与水面的振动速度有关,在此条件下,仿真计算得到的最大多普勒频移为 595.854 Hz,计算得到水表面波的振幅为 1 501.023 nm,与先前设定的振幅基本吻合.

假定水下声源产生振动,引起水表面的波动可以表示为:

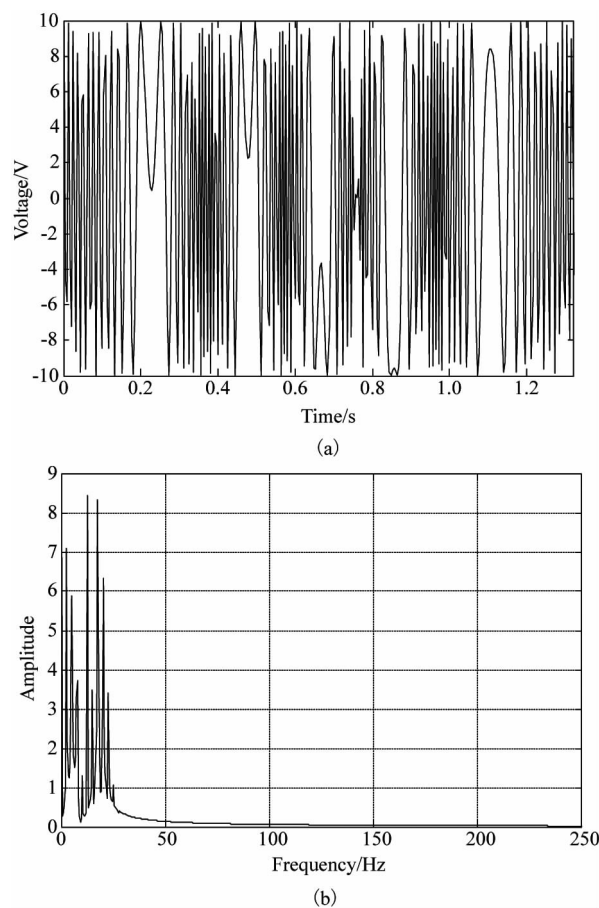


图 1 水下无声场振动的仿真结果与分析 (a)时域特征, (b)频谱特征

Fig. 1 Simulation results without vibrated-source under the water (a) time-domain, (b) frequency-domain

$$F_s(t) = A_s \sin(2\pi f_s t + \phi_s) , \quad (3)$$

其中  $A_s$ 、 $f_s$ 、 $\phi_s$  分别表示水表面波的振幅、频率和初始相位.若水下振动引起水表面波动的振幅在纳米量级,仿真时设  $A_s = 15$  nm,  $f_s = 300$  Hz,  $\phi_s = 0$ .同样水表面自然波动的条件为  $A_n = 1 500$  nm,  $f_n = 15$  Hz,  $\phi_n = 0$ ,仿真结果与频谱分析如图 2(a)和 2(b)所示:有 300 Hz 振动的特征出现,但特征比较微弱.

## 3 实验系统

与传统干涉仪的镜片结构不同,本实验采用全光纤的光束传输和相干,这样既能简化光路,提高系统的稳定性,又能降低对光学器件表面质量和光路校准的要求.另外,采用的均为商品化的光纤通讯器件,不仅质量有保证,而且整个系统的成本也能降低.

实验系统主要包括:信号发生器、光学气垫隔离平台、激光光源、功率放大器、光纤、三端光纤环行

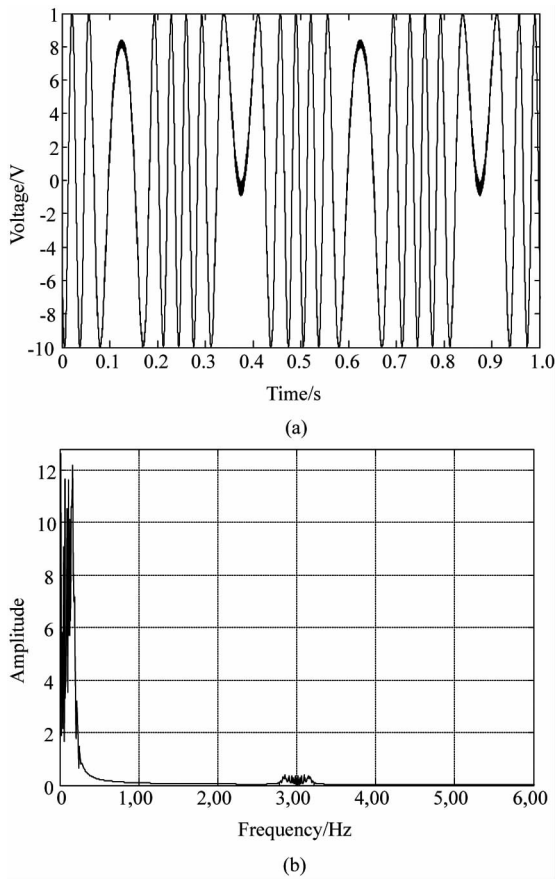


图2 水下有声场振动的仿真结果与分析 (a)时域特征,(b)频谱特征  
 Fig. 2 Simulation results with vibrated-source under the water (a) time-domain, (b) frequency-domain

器、光纤隔离器、光纤滤波器、数字示波器、水下扬声器、计算机,如图3所示。

系统采用零差工作模式,实验中激光器输出激光进入光纤隔离器,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;经过环形器后激光在光纤端面分成反射光与透射光,反射光是相干检测的参考光,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着表面振动的信息,发射光又经过透镜被光纤环形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产生相干,相干光进入到光电探测器,后经过 GPIB 接口将实验信号数据读取并传输到计算机,通过快速傅里叶变换可以得出水表面的振动频率。

实验中,激光器采用上海拜安科技有限公司 DS3200 系列的 1 550 nm 台式激光器,输出功率 10 mW, -3 dB 谱宽为 0.1 nm;光纤采用的 1 550 nm 的

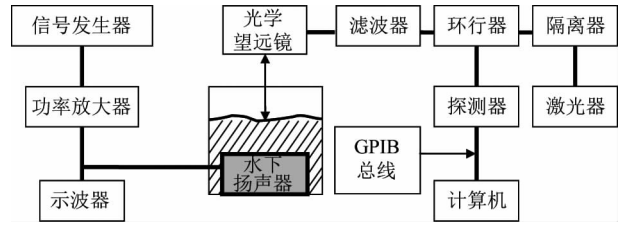


图3 实验装置示意图  
 Fig. 3 Test setup for demonstrating the feasibility of the acoustic-optic detection on the water surface

G652 单模光纤;数字示波器采用 Tektronix 公司的 TDS3052 双通道数字荧光示波器;信号发生器为 TFG2050 DDS 函数信号发生器,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。

### 4 实验结果与分析

当水下扬声器不发声时,平静水表面的自然波动探测结果与频谱分析如图 4(a)和 4(b)所示. 平静的水表面自然波动的频率在 6 ~ 30 Hz 范围内,水面自然波动的峰值频率在 10 ~ 20 Hz 之间. 通过对时域图中的辨向点之间的间隔时间进行统计<sup>[7]</sup>,得到大多数相邻辨向点之间的时间间隔在 20 ~ 60 ms,可计算出水表面波的频率介于 9 ~ 25 Hz 之间,这与仿真计算傅里叶变换得到的结果相符合,从而验证了探测结果的正确性。

将扬声器固定于水下 10 cm 处,振动频率分别为 40 Hz、1 280 Hz 和 4 800 Hz,图 5 给出激光相干探测结果(a)、(c)、(e)和频谱分析结果(b)、(d)、(f). 由图 5 可以看出:激光相干探测水表面,可将水下振动特征准确的探测并解调出来. 由于声音的传输过程与声音的频率密切相关,在相同传输距离的情况下,高频声波比低频声波的衰减大. 因此在同一水深情况下,随着水下声源振动频率的增加,探测的频率强度是递减的. 图(b)、(d)和(f)中的实验结果也证实了这一点。

当振动频率固定为 1 000 Hz,振源分别放在水下深度为 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 时,图 6 给出激光相干探测水表面的频谱分析结果. 从图 6 可以看出:虽然振源在不同的水下深度,但激光相干探测可准确地从水表面探测到振动的特征. 实验结果也发现:在相同的实验条件下,随着声源深度的增加,信号波峰的强度变小,说明随着振源在水下深度的增加,由它所引起的水表面波动的振幅随之减小. 由于

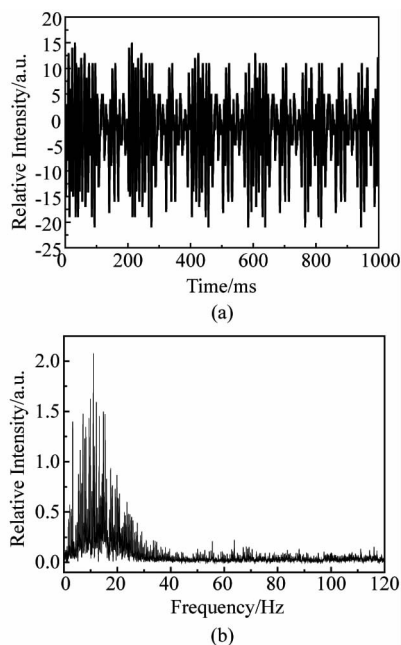


图4 平静水表面的自然波动激光相干探测的实验结果 (a) 时域特征, (b) 频域特征  
Fig. 4 Laser coherent detection results without vibrated-source under the water (a) time-domain, (b) frequency-domain

声音的传播过程与传输距离密切相关, 点声源(以球面波方式向各个方向辐射)辐射强度与传输距离成平方反比关系. 常温下, 球面波随距离衰减的关系为:

$$L_p = L_w - 20 \lg r - k \quad , \quad (4)$$

其中,  $k$  为修正系数. 在同一介质中, 距离  $r_1$  和  $r_2$  之间的声压级差值为

$$L_{p1} - L_{p2} = 20 \lg(r_2/r_1) \quad , \quad (5)$$

当  $r_2/r_1 = 2$  时, 衰减 6 dB, 即距离增加 1 倍, 声压级衰减 6 dB. 图中实验结果也得到证实:  $r_2 = 10$  cm 与  $r_1 = 5$  cm (以及  $r_2 = 20$  cm 与  $r_1 = 10$  cm) 时,  $r_2/r_1 = 2$ , 衰减了 6 dB, 因此 10 cm 水深的水表面波动的振幅的减小幅度较 5 cm 水深的水表面波动的振幅明显. 对于  $r_2 = 15$  cm 与  $r_1 = 10$  cm, 由于, 衰减了 3.5 dB, 15 ~ 10 cm 两种水深实验中水表面波动的振幅的减小幅度不明显. 同样对于  $r_2 = 20$  cm 与  $r_1 = 15$  cm,  $r_2/r_1 = 1.33$ , 仅衰减了 2.3 dB, 20 ~ 15 cm 两种水深实验中水表面波动的振幅的减小幅度更加不明显. 因此对于同一振动频率的声源, 随着声源水下深度的增加, 在水表面探测的频率强度也减小.

为了进一步证明激光相干探测系统的稳定性, 在水下 10 cm 处放置了两个扬声器作为振源, 采用 1 000 Hz 和 1 600 Hz 两个频率同时振动, 激光相干

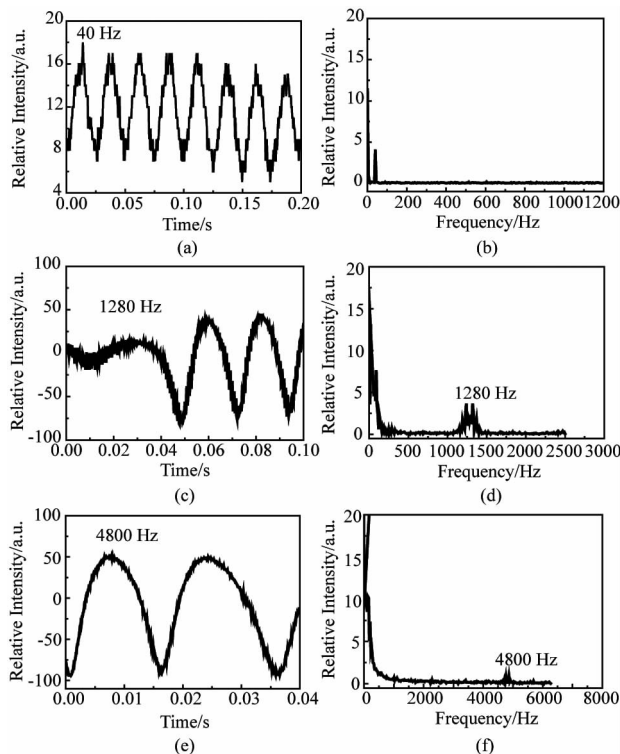


图5 振动频率分别为 40 Hz、1 280 Hz、4 800 Hz 时, 激光相干探测水表面的信号与分析结果 (a)、(c)、(e) 时域特征, (b)、(d)、(f) 频域特征  
Fig. 5 Laser coherent detection results with vibrated-source under the water with frequencies at 40 Hz, 1 280 Hz, and 4 800 Hz, respectively. Time-domain: (a), (c), (e). Frequency-domain: (b), (d), (f)

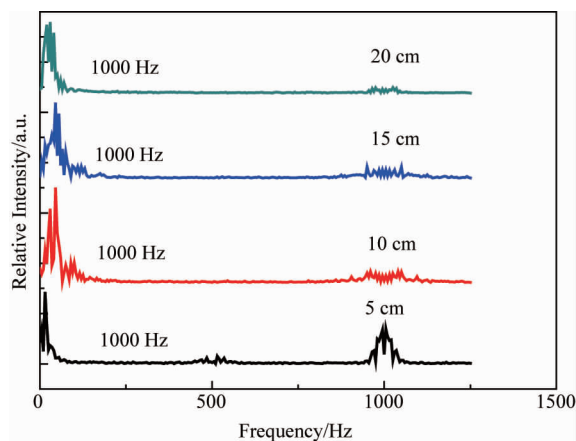


图6 振动频率为 1 000 Hz, 扬声器分别放在水下 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 深度时, 激光相干探测水表面的频谱分析  
Fig. 6 Laser coherent detection spectral-results with vibrated-source under the water at depth of 5 cm, 10 cm, 15 cm, and 20 cm, respectively

探测水表面的频谱分析结果如图 7 所示. 从图中可以看出, 两个频率特征清晰可辨, 因此激光相干探测可较好地在水表面探测到水下的各种振动特征.

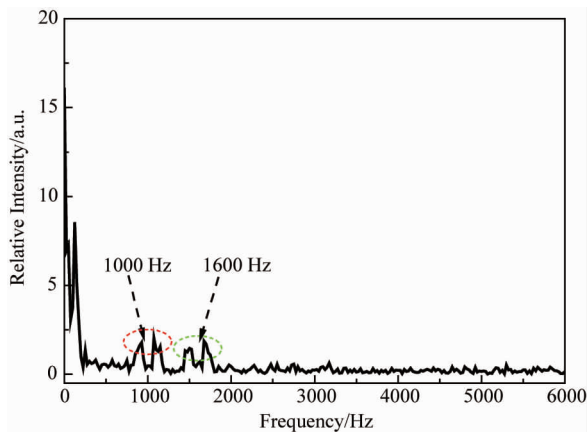


图7 两个扬声器固定于水下10 cm处,振动频率分别为1 000 Hz和1 600 Hz同时振动,激光相干探测水表面的分析结果

Fig. 7 Laser coherent detection results with two vibrated-sources simultaneously

## 5 结论

通过采用光纤光路代替传统光路,提高了系统的稳定性能.利用激光相干探测水下声源振动,在实验室条件下通过改变声源的不同参数,研究了水下声源的振动频率、多个频率以及声源的深度对相干探测的影响.结果表明:激光相干探测系统具有较好的稳定性,利用激光相干探测水表面来获取水下振源的振动特征的技术方案是可行的.

## References

- [1] Antonelli L, Kirsteins I. Empirical acousto-optic sonar performance versus water surface condition [C]. In OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. IEEE, 2001, 3: 1546 - 1552.
- [2] 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.
- [3] LIN Yu-Chi, CUI Yan-Ping, HUANG Yin-Guo. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Optics and Precision Engineering* (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. *光学精密工程*). 2006, 14(3): 509 - 514.
- [4] ZHANG Xiao-Lin, TANG Wen-Yan, SUN He-Yi. Laser interferometry of underwater acoustic signals [J]. *Optics and Precision Engineering* (张晓琳, 唐文彦, 孙和义. 水下声信号的激光干涉测量. *光学精密工程*). 2010, 18(4): 809 - 815.
- [5] HE Yan, WANG Wen-Kui, XIA Wen-Bing, et al. Laser Doppler vibrometer for acousto-optics communication [J]. *Chinese Journal of Lasers* (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. *中国激光*), 2007, 34(5): 703 - 706.
- [6] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: a review [J]. *Proc. SPIE*. 2003, 5102: 240 - 249.
- [7] Grenaker E F, Geisheimer J L, Asbell D. Extraction of micro-Doppler data from vehicle targets at x-band frequencies [J]. *Proc. SPIE*. 2001, 4374: 1 - 9.
- [8] Li J, Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 284 - 291.
- [9] Lei J J, Lu C. Target classification based on micro-Doppler signatures [C]. *IEEE International Radar Conference*, 2005, 179 - 183.
- [10] Chen V C. Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features [C]. *IEEE International Radar Conference*, 2005, 348 - 353.
- [11] CHEN Xing-Yong, LIU Yong-Xiang, LI Xiang, et al. Extraction of micro-Doppler signatures for radar target [J]. *Signal Processing* (陈行勇, 刘永祥, 黎湘, 等. 雷达目标微多普勒特征提取. *信号处理*). 2007, 23(2): 222 - 226.
- [12] SUN Yang. Experimental research on 1550 nm laser coherent radar for detecting micro-doppler effect [D]. Yantai University (孙洋. 1550 nm 激光相干雷达探测微多普勒效应的实验研究. 烟台大学光电学院), 2010.
- [13] YI Hou-Hui, SUN Jin-Zuo. Theoretical study on using laser to detect the underwater acoustic signal [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)* (伊厚会, 孙金祚. 利用激光探测水下声场的理论研究. *烟台大学学报 (自然科学与工程版)*). 2003, 16(4): 252 - 255.
- [14] DAI Zhen-Hong, SUN Jin Zuo, SUI Peng-Fei. Theoretical study on the water surface transversal mini-wave due to the underwater sound field [J]. *Journal Of National University Of Defense Technology* (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. *国防科技大学学报*). 2004, 26(1): 95 - 98.