

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0432

# 水下低频声信号的激光探测及波的衰减

苗润才, 王玉明, 孟峰, 马静

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

**摘要:**为了探测几十赫兹的低频水下声信号,建立了水下低频声信号的激光探测系统,得到了稳定、清晰的衍射图样.得到了衍射图样的宽度与声源距离的变化关系,声源距离越小,衍射图样越宽.当水下声波传至水表面后,实验上得到了表面声波的衰减特性,理论上得到了衍射图样的角宽度和液体表面波振幅的解析关系式.发现表面波振幅的衰减随距离是指数型衰减.并研究了衰减系数随频率的变化,频率不同衰减系数也不同,而且频率越大,衰减系数越小.

**关键词:**水下声源;低频波;液体表面;衰减系数

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)04-0432-5

## Detection of Underwater Low-frequency Acoustic Signal and Wave Attenuation

MIAO Run-cai, WANG Yu-ming, MENG Feng, MA Jing

(Institute of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** A simple measurement system is developed to study the optical effect of the low-frequency liquid surface wave which excited by underwater acoustic source. The high stability and clear diffraction pattern was observed experimentally. The relationship between diffraction patterns divergence angle and the distance of the acoustic signal was derived. Furthermore, with the increase of distance, the diffraction patterns divergence angle will decrease. The damping characters of the liquid surface wave was theoretically obtained when underwater acoustic wave spread to the liquid surface. The analytical expression between diffraction patterns divergence angle and the liquid surface wave amplitude was theoretically derived. It was found that the surface wave amplitude is exponent attenuation with the change of the horizontal distance. The attenuation coefficients is dependent on the frequency of liquid surface acoustic wave, and the greater frequency, the smaller attenuation coefficient.

**Key words:** Underwater acoustic source; Low-frequency wave; Liquid surface; Attenuation coefficient

## 0 引言

激光问世以后,很快用于研究表面声波(Surface Acoustic Wave, SAW).常用的方法有激光衍射检测技术、激光斜率扫描技术、激光成像检测技术、激光干涉测量技术以及激光相位扫描检测技术等<sup>[1]</sup>.在固体表面声效应中,为了获得较大的衍射角分布,通常采用超声波技术.但对于固体表面的超

声波,其振幅较小,一般在纳米数量级<sup>[2-4]</sup>.为了实现低频率大振幅的表面声光效应,人们采取了液体表面,1979年,Weisbuch等人首次提出了用液体表面波实现光学衍射光栅,并以此建立了表面张力的光学测量方法<sup>[5]</sup>.J. D. Barter曾提出成像法研究表面波<sup>[6]</sup>.文献<sup>[7-12]</sup>用激光衍射法研究了频率为几十到几百赫兹的液体表面声波,得到了反衬度非常高的衍射图样<sup>[7-12]</sup>.上述低频液体表面波的激光研究

基金项目:陕西省重大科技创新专项资金(No. 2010ZKC01-18)和陕西省自然科学基金(No. 2010JM1003)资助

第一作者:苗润才(1957-),男,博导,主要研究方向为声光理论及技术. Email:rcmiao@snnu.edu.cn

通讯作者:王玉明(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为低频水下声信号的激光探测. Email:wangyumingx@126.com

收稿日期:2012-11-27;录用日期:2013-01-15

中,均直接在液体表面激发,产生表面声波.对于水下声信号的研究,M. S. Lee, B. S. Bourgeois 和 Lynn. Antonelli, A Fletcher 曾用激光传感技术探测水下声信号<sup>[13-14]</sup>Ju. P. Lagution 和 B. A. Chunine, Lynn T 用激光散射法研究了水下环境<sup>[15]</sup>.但是,上述水下声信号的研究,声频率均在千赫兹以上,对于频率为千赫兹以下的水下声信号的光学研究,迄今为止还很少看到相关的报道.本文对频率为几十赫兹的水下声信号,建立了激光检测系统,实验上得到了反衬度非常高的衍射图样,研究了衍射图样随水下声源距离的变化关系,并给出了声波的衰减系数.

## 1 实验装置

实验装置如图 1(a)所示,由样品池、声信号系统、光源系统、光电检测和数据处理系统组成.样品池是一个有机玻璃水槽,里面盛有液体,将其放置在防震台上,以减小外界干扰.声信号发生系统包括信号发生器、功率放大器和水下声源.水下声源使用一个功率为 20 W,阻抗为 8  $\Omega$  的水下扬声器,并将其放置在底部减震膜上,距离液体表面的距离为 6.5 cm.低频信号发生器产生的电信号,通过功率放大器放大后,再驱动水下扬声器.扬声器在水下产生声波,通过水介质传播至水面,形成表面声波.光源为 He-Ne 激光器,其波长为 632.8 nm,激光束光斑直径约为 2.3 mm.激光束经过光阑后以 1.54 rad 的入射角斜入射到样品池中的液面上,形成椭圆光

斑,椭圆光斑的短,长轴分别为 2.3 mm 和 70.3 mm,椭圆光斑的长轴与表面波传播方向平行.当激光束照射到液体表面上,经液体表面波调制后,其反射光束在观察屏上形成清晰衍射图样,实验中入射点到观察屏的距离约为 5 m.光电检测系统使用 CCD 检测并采集图样,CCD 的大小为 7.95 mm  $\times$  6.45 mm, S/N 超过 48 dB.将采集到的数据直接输入计算机.在计算机上可以显示、储存、处理图样.当观察屏与 CCD 位置确定后,在观察屏上设置横向标准距离,并得到该横向标准距离与 CCD 像素之间的对应关系,通过 Matlab 软件对图像进行扫描分析,可得到衍射图样的横向坐标值.

## 2 理论分析

虽然实际上液体表面粒子运动较为复杂,但是在理论处理时,通常把这种运动在水面形成的表面波波函数表示为

$$Y = A \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

式中  $Y$  为横向坐标,  $X$  是沿波传播方向的坐标,  $A$  是 SAW 振幅,  $\omega$  是 SAW 的频率,  $k$  为波矢,且  $k = 2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  是 SAW 波长.若液体表面波为几十赫兹的频率,未扩束的激光光束照射在液体表面波上,此时液体表面波就相当于一个位相型光栅,入射光束被液体表面波调谐后在远场叠加而发生衍射,出现衍射图样.如图 1(b),一个波面上任意一点的反射光束与相邻波面上对应点的反射光束具有相同的反射方向.因为这两点对应的波的斜率相同,所以两束反射光以相同的方向传播.假定这束反射光束与竖直方向上的夹角为  $\theta - \varphi$ .由于光束远大于 SAW 波速,且波的衰减较小,则在计算两束光的光程差时可近似认为波形无变化.通过对图 1(b)的分析,根据几何光学原理,很容易得到反射区域强度的表达式为

$$I_r(\varphi) \propto \cos^2 \left\{ \frac{\pi \Lambda}{\lambda} [\sin \theta - \sin(\theta - \varphi)] \right\} \quad (2)$$

式中,  $I_r(\varphi)$  表示反射光强度是  $\varphi$  的函数,  $\varphi$  是衍射图样中某一衍射亮条纹到中央亮纹的角宽度,  $\lambda$  是光波波长,  $\theta$  表示光的入射方向,  $\theta - \varphi$  表示反射方向.由式(2)可知,在远场观察面上会有衍射条纹,相邻条纹间距相对入射点的张角  $\Delta\varphi$  可写为

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{\Lambda \cos(\theta - \varphi)} \quad (3)$$

由于  $\varphi$  角远远小于入射角  $\theta$ , 式(3)可近似为

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{\Lambda \cos \theta} \quad (4)$$

在几十赫兹频率时,表面波波长远大于入射光波长,因此为了得到较大的张角  $\Delta\varphi$ ,入射角  $\theta$  应尽量大一些.

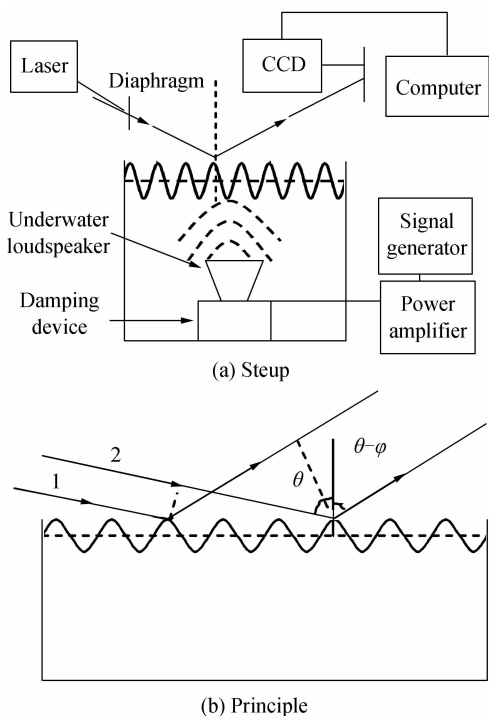


图 1 实验装置及原理

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup and principle

由于表面波任意一点上反射光的传播方向取决于这一点所在的波形,且反射光的方向由  $\theta - \varphi$  表示.由式(1)有  $\frac{dY}{dx} = kA \sin(\omega t - kx)$ ,由几何光学可知:对于同一个入射点,当反射光线转  $\varphi$  角度时,其法线一定转  $\varphi/2$ .对图 1(b)所示入射点上表面的斜率可表示为  $dY/dx = \tan(\varphi/2)$ .所以有

$$\tan(\varphi/2) = kA \sin(\omega t - kx) \quad (5)$$

式(5)可用来描述任意点的波形, $x$ 表示水平坐标.由式(5)可知,最大的  $\varphi$ 角  $\varphi_{\max}$ 满足

$$\varphi_{\max} = 2 \arctan(kA) \quad (6)$$

讨论表明,液体表面的 SAW 导致了发射光束的衍射,衍射条纹的角分离大小则依赖于表面波的波长,而式(6)说明衍射条纹形成的区域必定在角  $\theta - \varphi_{\max}$ 和角  $\theta + \varphi_{\max}$ 之间的范围内.如果用  $\Delta\Phi$ 来定义这个角范围则

$$\Delta\Phi = 4 \arctan(kA) \quad (7)$$

由式(2)可知在观察屏上会有衍射条纹,由式(7)可知这些条纹必定被限定在给定的区域.实验上测量出相邻条纹间隔相对于入射点的张角  $\Delta\varphi$ 以及整个衍射条纹相对于入射点的张角  $\Delta\Phi$ ,把这些数据及入射光波波长  $\lambda$ 和入射角  $\theta$ 分别代入式(3)和式(7)很容易计算出表面声波的波长和振幅,实验得出表面波的波长为 9.5 mm.

### 3 实验结果

按图 1(a)所示的实验装置,调节入射光束的入射角,以便得到稳定清晰的衍射图样.实验时,观察屏距入射点的距离约为 5 m,用 CCD 直接对观察屏上的衍射图样进行成像,调节 CCD,当 CCD 视频中的衍射图样达到最佳的状态时,对衍射图样进行拍摄.图 2(a)为信号发生器无信号输出时,在观察屏上观察到的图样.当无信号输出时液体表面相当于一个平面镜,激光束入射到液体表面时则相当于平面镜反射,因而在观察屏上观察到的是圆形光斑.



(a) The patterns without the signal (b) The patterns from the SAW sometime

图 2 观察屏上的衍射图样

Fig. 2 The diffraction patterns in the observing screen

图 2(b)为有信号输出时某一时刻在观察屏上观察到的图样.当激光束入射到有信号存在的液体表面时,信号源通过液体传播到液体表面,在液体表面激发液体表面波,此时液体表面就相当于一个位相型光栅,激光束入射到液体表面受到表面波的调谐从而在观察屏上形成了清晰、稳定的衍射图样.

当观察屏与 CCD 的位置固定后,确定 CCD 图像像素数,并计算出标准物件实际宽度与对应像素的比值,称之为距离与像素比.实验中,激光光束的入射角为 1.54 rad,为了使入射角在实验时不发生变化,在实验时液面高度低于水槽高度.当激光光束的入射点距离水下声信号的水平距离为 2 cm 时,改变信号发生器的频率,信号发生器的频率从 50 Hz 到 68 Hz 变化,间隔为 2 Hz,同时用计算机记录相应频率的衍射图样,从而得到了此时一系列的衍射图样.改变信号源到激光光束入射点的水平距离,在 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm 处重复上述实验,得到了对应点一系列的衍射条纹.图 3 为频率为 54 Hz 时,信号源在不同位置处的衍射图样.

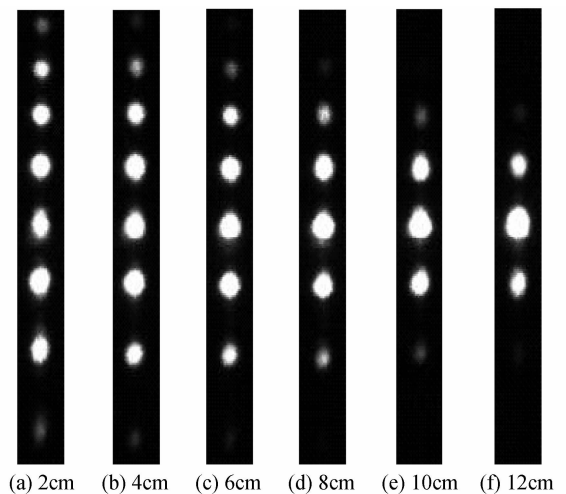


图 3 54 Hz 时在不同位置的衍射图样

Fig. 3 The diffraction patterns from different position at 54 Hz

从图 3 中可看出,随着水下声信号到激光光束入射点水平距离的增大,衍射条纹宽度是减小的.用 Matlab 对衍射图样进行扫描分析,并利用之前建立好的比例尺,得出衍射图样相邻条纹间的角宽度  $\Delta\varphi$ 以及衍射条纹的宽度  $\Delta\Phi$ ,把这些数据及入射光波波长  $\lambda$ 和入射角  $\theta$ 分别代入式(4)和式(7)很容易计算出表面声波的波长,以及不同位置处的振幅.用 Matlab 对不同位置处表面波的振幅进行拟合,得到了表面波振幅随位置的变化关系.图 4 为振幅随位置的变化曲线,其中(a)为 54 Hz 时的变化曲线,(b)为 66 Hz 时的变化曲线.

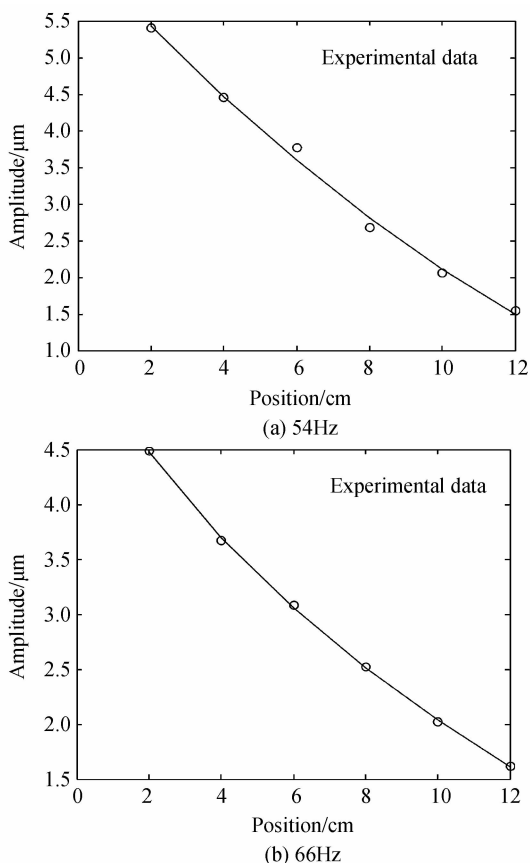


图 4 不同位置处振幅的变化曲线  
Fig. 4 The curve of the amplitude in different position

为了便于观察表面波的衰减特性,先将图 4 中的振幅数据取以 e 为底的对数,然后以这些数据为纵坐标,仍然以入射光束入射点到信号源的水平距离为横坐标画图,其结果如图 5,图 5(a)为频率 54 Hz 时的曲线,图 5(b)为频率 66 Hz 时的曲线.由图 5 可以看出,无论频率是 54 Hz 还是 66 Hz,振幅的自然对数随信号源到激光光束入射点的水平距离的变化都是直线型的,也就是说表面波振幅的衰减是指数型衰减.频率不同其衰减系数也不同,实验分别测得 54 Hz 水面波振幅的衰减系数为 0.012 5/cm,66 Hz 水面波振幅的衰减系数为 0.010 2/cm,而且频率越大,衰减系数越小.

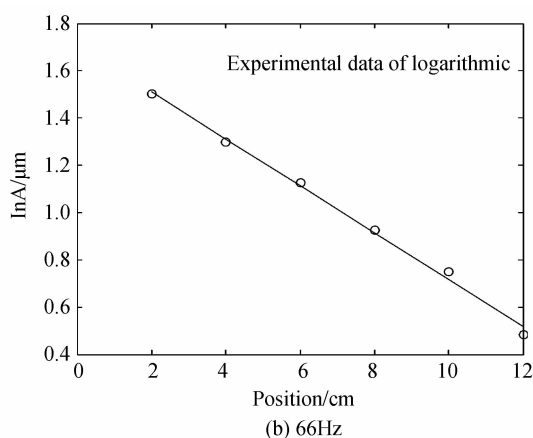
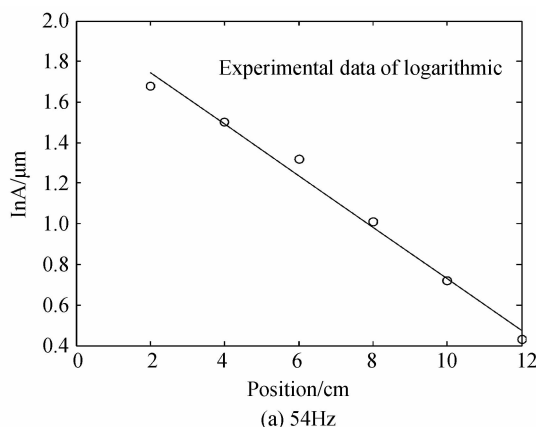


图 5 振幅对数的变化曲线  
Fig. 5 The curved of the amplitude logarithm

### 4 结论

1) 建立了低频水下声信号激发液体表面波的光学测量技术,该技术用于几十赫兹的水下声信号的检测与测量,实验上得到了清晰、稳定的衍射图样.

2) 衍射条纹具有显著的特点,条纹被限制在一定的空间范围内,随着水下声信号到激光光束入射点水平距离的变化,衍射条纹的宽度也会发生变化,即距离越大,衍射条纹的宽度越小.

3) 理论上分析了表面波的光衍射效应,给出了衍射图样的角宽度和液体表面波振幅的解析关系式,同时也给出了表面波波长的表达式.

4) 实验得出在不同位置处表面波的振幅,发现振幅随着信号源到激光光束入射点水平距离的变化是呈指数衰减的,当波的频率不同,衰减系数的大小不同,频率越大,衰减系数越小.

### 参考文献

[1] ZHANG Ya-ni, MIAO Run-cai. The detection of surface acoustic wave by laser and its new ideas[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(2): 6-8.  
张亚妮,苗润才.表面波的激光检测技术[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(2): 6-8.

[2] DEVOLDER S, WEVERS M, de MEESTER D. Thin layer thickness measurements based on the acoustic-optic technique [J]. *Applied Physics Letter*, 1996, **68**(12): 1732-1734.

[3] BRIER R, LEROY O, DEVOLDER S. Surface roughness determination using the acoustic-optic technique: theory and experiment[J]. *Applied Physics Letter*, 1997, **75**(5): 599-601.

[4] YAMANAKA K, CHO H. Precise velocity measurement of surface acoustic wave on bearing ball[J]. *Applied Physics Letter*, 2000, **76**(19): 2797-2799.

[5] WEISBCH, GARBAY F. Light scattering by surface tension waves[J]. *American Journal of Physics*, 1979, **47**(4): 355-356.

[6] BARTER J D, LEE PHY. Real-time wave amplitude spectrum analyzer for air-liquid interfaces [J]. *Applied Physics Letter*, 1994, **64**(15): 1896-1898.

- [7] MIAO Run-cai, YANG Zong-li. Physical properties of liquid surface wave and it's optical diffraction[J]. *Acta Physica Sinica*, 1996, **45**(9): 1521-1525.  
苗润才, 杨宗立. 液体表面波物理特性及其光学效应的研究[J]. *物理学报*, 1996, **45**(9): 1521-1525.
- [8] MIAO Run-cai, YANG Zong-li, ZHU Jing-tao, *et al.* Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction [J]. *Applied Physics Letter*, 2002, **80**(17): 3033-3035.
- [9] DONG Jun, QI Jian-xia, MIAO Run-cai. Measurement of the damping of liquid surface wace by diffraction[J]. *American Journal of Physics*, 2007, **37**(3B): 1129-1133.
- [10] ZHU Feng, MIAO Run-cai, XU Chun-long, *et al.* Measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser diffraction[J]. *American Journal of Physics*, 2007, **75**(10): 896-898.
- [11] MIAO Run-cai, SHI Jian, ZHAO Xiao-feng. Determination of the attenuation coefficient of surface acoustic wave by means of light interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 382-385.
- 苗润才, 时坚, 赵晓凤. 干涉法测量低频液体表面波的衰减系数[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 382-385.
- [12] LUO Dao-bin, MIAO Run-cai, LIU Xiang-lian, *et al.* Study on diffraction and damping characteristics of low frequency liquid surface waves[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 584-586.  
罗道斌, 苗润才, 刘香莲, 等. 低频液体表面波的光衍射及衰减特性的研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(6): 584-586.
- [13] LEE M S, BOURGEOIS B S, HSIEH S T, *et al.* A laser sensing scheme for detection of underwater acoustic signals [J]. *IEEE Conference Publications*, 1988: 253-257.
- [14] ANTONELLI L T, FLETCHER A. BLACKMON. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air, acoustic-optic sensor [J]. *IEEE Journal of oceanic Engineering*, 2006, **31**(1): 179-187.
- [15] LAGUTION J P, CHUNIN B A, CHUNIN S A. Research of dispersion of laser radiation in the water environment[J]. *Information Optics*, 2010, **19**(1): 50-53.

\*\*\*\*\*

• 下期预告 •

## 基于 CCD 积分时间自动调节的生化分析仪用 分光光度计的研究

任重, 刘国栋, 黄振

(江西科技师范大学 光电子与通信重点实验室, 南昌 330038)

**摘要:** 在利用生化分析仪用分光光度计对血液等样品进行分析时, 由于样品中不同组分对不同波段的光吸收有所差异, 尤其在能量衰减较大和非特征吸收波段表现得更加突出, 并且电路中各种噪音和光路杂散光的存在, 使得光度测量的准确率降低. 本文通过使用线阵 CCD 积分时间的自动调节和分段分时采光等算法优化的方法, 将强吸收与弱吸收分开曝光, 在保证强吸收正常的前提下, 自动调整积分时间来增大弱吸收的信号. 采用自行研制的基于 Czerny-Turner 型分光光路和线阵 CCD 探测的高分辨率生化分析仪作为分光光度计, 经实验测试, 该方法有效地提高了光度测量的准确度, 同时提高了系统的性能和信噪比. 此外, 该分光光度计系统的光谱测量范围可达 300~800 nm, 波长分辨率优于 2 nm.

**关键词:** 光谱学; 分光光度计; 积分时间; 光谱吸收度; 线阵 CCD