

文章编号: 1005-5630(2015)04-0344-04

低频水下声信号调制下衍射光场的分布

王玉明, 王文成, 韩鹏斌

(西安航空学院 理学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 建立了一个简单可行的光学系统用于探测低频水下声信号。水下声信号产生的低频声波通过水介质传到液体表面产生表面波, 激光束入射到液面时, 在光屏上观察到了清晰、稳定的衍射图样, 发现在低频水下声信号的调制下衍射光场的分布具有明显的不对称性。实验中得到了衍射图样光斑光强与位置的分布, 理论分析发现, 结果与实验所观察到的现象是很吻合的。结果表明, 在低频水下声信号调制下衍射光场的分布是非对称分布的。

关键词: 低频水下声信号; 液体表面; 衍射图样; 非对称分布

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.04.013

The distribution of diffraction light field base on the low-frequency underwater acoustic signal

WANG Yuming, WANG Wencheng, HAN Pengbin

(School of Science, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A measurement system is developed to detect the low-frequency underwater acoustic signal. The clear and high stable diffraction pattern is observed experimentally when the laser beam illuminates on the liquid surface which is modulated by the underwater acoustic signal, the diffraction fringes is asymmetric distribution. The asymmetry of the position and intensity of the diffraction spot were explained with the laser oblique incidence. The experiment is consistent with the theory. The results show that it is asymmetric distribution of the diffraction light field which is modulated by low-frequency underwater acoustic signal.

Keywords: low-frequency underwater acoustic signal; liquid surface; diffraction pattern; asymmetric distribution

引 言

声光效应作为很重要的物理现象, 一直以来都受到人们的重视^[1-3], 经常用来探测声信号。Weisburg 等首次提出利用液体表面波的光栅衍射效应来研究液体的表面波^[4]。液体表面波的研究在很长一段时间内只是停留在液体表面激发表面波的研究方式^[5-12]。对于水下声信号激发液体表面波的研究大多采用光—电法或者激光遥感法^[13-14], 很少有人用光学方法研究水下声场。基于这一问题本文利用声光效应建立了一种简单、可行的用于探测水下声场的光学探测系统。当激光束斜入射到低频水下声信号调制的液

收稿日期: 2014-12-01

基金项目: 陕西省教育厅项目(2013JK0627); 陕西省自然科学基金项目(2013JMI008)

作者简介: 王玉明(1987—), 男, 助教, 主要从事水下低频声信号的激光探测研究工作。E-mail: wangyumingx@126.com

面时,观察到了稳定、清晰的衍射图样。发现衍射图样的分布不同于其他衍射图样的分布,得到在低频水下声信号激发液体表面波的调制下,衍射图样中光斑位置和光强是不对称分布的,且衍射图样的正、负级次也是明显的不对称分布的。

1 实验装置

实验装置如图 1(a)所示,包括:水槽、信号源、光源、探测系统以及数据存储与处理系统。样品池是一个有机玻璃水槽,里面盛有水。声信号系统包括低频信号发声器、功率放大器以及水下扬声器。液体表面距水下扬声器的距离为 6.5 cm,信号发声器产生的低频声信号被功率放大器放大后通过介质水传到水表面,在水面形成了表面波。光源为 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm,激光束直径约为 2.3 mm。激光束以 1.53 rad 的入射角入射到水表面,在水面形成椭圆光斑,椭圆光斑的短轴长 2.3 mm,长轴长 66.6 mm。其中表面波沿椭圆光斑长轴方向传播。实验中光屏到入射点的距离约为 5 m,CCD 作为探测系统用来采集图样,采集到的数据直接输入到计算机,用计算机来存储与处理图样。

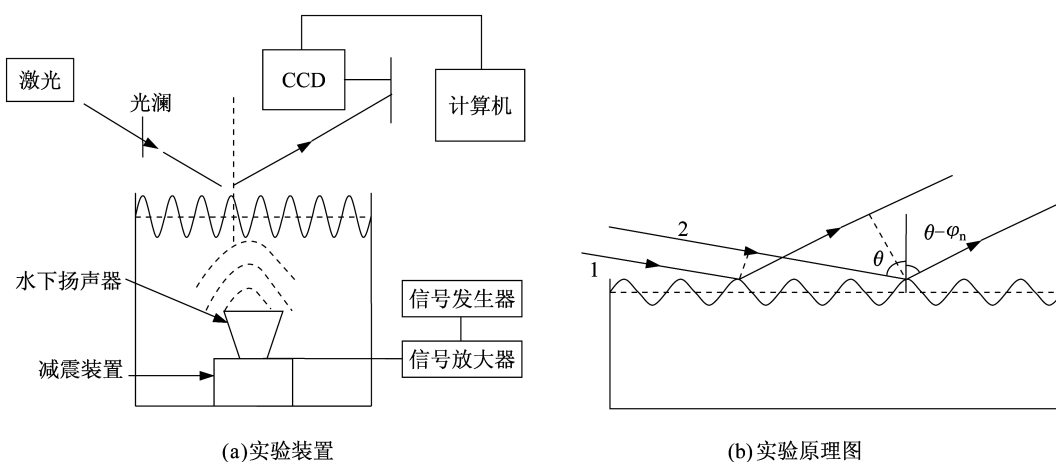


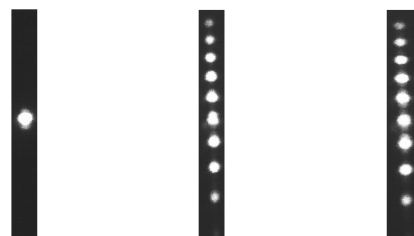
图 1 实验装置和实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup and principle

2 实验及实验结果

实验装置如图 1(a)所示,为了得到稳定、清晰的衍射图样,实验前必须先调节激光束的入射角。实验时直接用 CCD 对衍射图样进行成像,调节 CCD 焦距及其位置,当 CCD 对衍射图样的成像达到理想状态时,对衍射图样进行成像拍照并用计算机记录相应的衍射图样。实验中光屏到入射点的距离约为 5 m,当光屏与 CCD 的位置固定后就可以来确定 CCD 像素与衍射图样宽度的比值,实验中在光屏上放置一个宽度为定值的标准物体,得到该标准物体成像的宽度与像素数就可以得到距离与像素的比值,我们在这里称之为距离与像素比。实验时,改变信号发声器的频率,用计算机记录相应频率的衍射图样。本实验中,低频声信号的频率间隔为 2 Hz,频率从 48 Hz 到 62 Hz 发生变化,得到一系列与其频率相应的衍射图样如图 2 所示。其中图(a)是无声信号时的图样,当激光入射到无低频声信号调制的液面时,相当于平面镜反射,因此,光屏上观察到的图样是一个光斑;图(b)、图(c)分别是当水下声信号的频率为 52 Hz 与 56 Hz 时的衍射图样。

从图 2 中可以明显看出衍射图样中光斑从上到下间距越来越大,具有非对称分布的特性。用 MATLAB 软件对图(b)、图(c)进行扫描与拟合,结果如图 3 所



(a) 无信号时图样 (b) 52 Hz 衍射图样 (c) 56 Hz 衍射图样

图 2 不同时刻衍射图样

Fig. 2 Diffraction patterns at different moment

示。衍射图样中央光斑的位置与图 3 下凹位置相对应。在这里我们定义衍射图样中央光斑的上,下方分别是衍射图样的正,负级。从图 3 中可以明显的观察到同级正、负光斑的光强是不相等的,且正级光斑光强是大于负级光斑光强;同时也可以得到正级光斑的间距是小于负级光斑的间距的。也就是说在低频水下声信号的调制下,衍射光场的分布是不对称的。

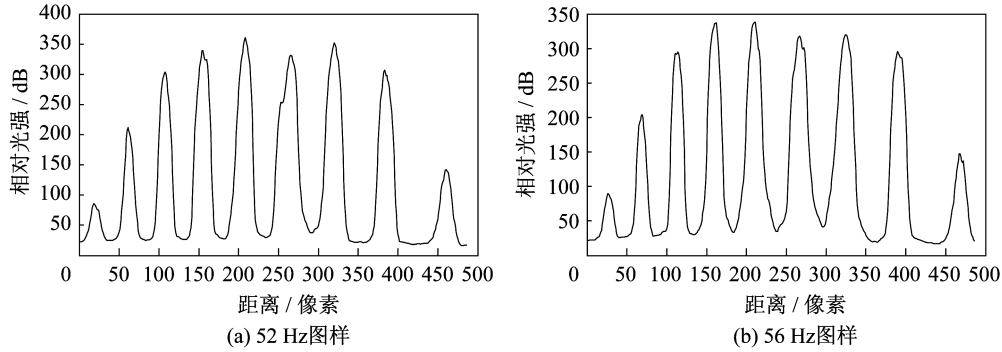


图 3 纵向扫描图样
Fig. 3 Longitudinal scan pattern

3 理论分析

3.1 衍射光斑的强度分析

如图 1(b)所示,当有水下声信号调制时,水表面波相当于位相型光栅。其中激光入射角为 θ , φ_n 为 n 级光斑到零级光斑的半角宽度。衍射角为 $\theta - \varphi_n$ 。在光栅衍射中,衍射光斑的光强是干涉因子和衍射因子的乘积。其中,衍射因子用 I_d 表示,干涉因子用 I_i 表示,衍射光斑的强度为: $I = I_d \times I_i$ 。

根据傅里叶光学,单周期衍射因子 I_d 为

$$I_d = \frac{\Lambda^2}{\lambda_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos^2 \theta J_n^2 \left(\frac{4\pi h \cos \theta}{\lambda} \right) \times \text{sinc}^2 \left[\lambda \left(\frac{\varphi_n}{\lambda} - \frac{n}{\Lambda \cos \theta} \right) \right] \quad (1)$$

式中: Λ 为表面波波长; h 为表面波振幅; 液面到光屏的距离为 z ; sinc 是特殊函数; J_n 是 n 阶第一类贝塞尔函数; n 为整数。

根据光的干涉原理,可求出多周期干涉因子 I_i 为

$$I_i = \left[\frac{\sin \left\{ \frac{N\pi\Lambda}{\lambda} [\sin \theta - \sin(\theta - \varphi_n)] \right\}}{\sin \left\{ \frac{\pi\Lambda}{\lambda} [\sin \theta - \sin(\theta - \varphi_n)] \right\}} \right]^2 \quad (2)$$

式中: N 为椭圆光斑长轴包含完整的液体表面波的个数; λ 为激光波长。

根据衍射因子,对于 n 级条纹,光斑的半角宽度为: $\Delta\Phi = \frac{\lambda}{\Lambda}$ 。根据干涉因子,衍射图样的半角宽度为:

$\Delta\Phi = \frac{\lambda}{N\Lambda \cos[\theta - \varphi_n]}$ 。实际中,光斑的半角宽度是由半角宽度小的因子决定的。实验中 N 的值为 6 到 7, $N \cos(\theta - \varphi_n) > 1$, 因此,干涉因子决定衍射光斑的半角宽度。

当激光束斜入射水表面时,当 $n > 0$ 时, $\varphi_n > 0$; $n < 0$ 时, $\varphi_n < 0$ 。可得到 $n > 0$ 时衍射光斑的半角宽度小。由 $I = I_d \times I_i$ 可知衍射图样光斑的强度应该是相等的。但是,本实验中各级衍射光斑的半角宽度不相等,且衍射图样中正级光斑的半角宽度小于负级光斑的半角宽度。因此,对于低频水下声信号调制的衍射图样而言同级正光斑的强度大于负级光斑的强度。从实验结果可以明显的看出 $I_{+1} > I_{-1}$, $I_{+2} > I_{-2}$, $I_{+3} > I_{-3}$ (I_n 表示 n 级衍射光斑的强度),实验结果与理论分析是吻合的。

3.2 衍射光斑的位置分析

从图 3 中容易得到,衍射图样正级光斑到中央光斑的像素是小于负级光斑到中央光斑的像素的,且负级光斑间距的像素大于正级光斑间距的像素。实验中根据之前建立好的比例关系: 1 像素 = 0.025 3 mm 很容易得到衍射图样的间距和各级光斑到中央光斑的距离。表 1 为各级光斑间距的分布情况,表 2 为各级光斑到中央光斑的距离。

表1 衍射图样光斑的间距
Tab.1 Spacing of diffraction faculae

间距/cm	d_{54}	d_{43}	d_{32}	d_{21}	d_{10}	d_{-10}	$d_{(-2)(-1)}$	$d_{(-3)(-2)}$	$d_{(-4)(-3)}$	$d_{(-5)(-4)}$
52/Hz	1.037	1.113	1.164	1.366	1.417	1.467	1.594	1.973		
56/Hz	1.031	1.104	1.139	1.240	1.392	1.543	1.720	1.999		

从表1中可较易得到无论是52 Hz的衍射图样还是56 Hz的衍射图样,在衍射图样中衍射光斑的间距是不相等的,也就是说在低频水下声信号的调制下所产生的衍射图样是不等间距分布的,即衍射图样的分布是不均匀的。从表2中可以得到,当水下低频声信号调制时频率为52 Hz时衍射图样同级正、负衍射光斑到中央(零级)光斑的距离是不相等的;同样当低频声信号的频率为56 Hz时同级正、负光斑到中央(零级)也是不相等的,也就是说对于衍射图样在低频水下声信号的调制下衍射图样正、负级是不对称的。结果与实验所观察到的是很吻合的。

表2 各级光斑到中央光斑的距离
Tab.2 Distance from different order faculae to the central faculae

间距/cm	d_{50}	d_{40}	d_{30}	d_{20}	d_{10}	d_{-10}	$d_{(-2)0}$	$d_{(-3)0}$	$d_{(-4)0}$	$d_{(-5)0}$
52/Hz	6.097	5.060	3.947	2.783	1.417	1.467	3.061	5.035		
56/Hz	5.558	4.521	3.518	2.379	1.392	1.543	3.264	5.262		

4 结论

建立了一个简单的光学测量系统用于探测水下声信号。当激光束入射到有低频水下声信号调制的液体表面时,观察到了清晰、稳定的衍射图样,发现在低频水下声信号的调制下衍射光场的分布具有明显的不对称性。实验中得到了衍射图样光斑光强与位置的分布,结果与实验所观察到的现象是很吻合的。结果表明,在低频水下声信号的调制下衍射光场的分布是非对称分布的。

参考文献:

- [1] ADLER R, KORPEL A, DESMARES P. An instrument for making surface waves visible[J]. IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, 1968, 15(3): 157-160.
- [2] KORPEL A, LAUB L J, SIEVERING H C. Measurement of acoustic surface wave propagation characteristics by reflected light[J]. Applied Physics Letters, 1967, 10(3): 295-298.
- [3] DEVOLDER S, WEVERERS M, DEMEESTER P. Thin layer thickness measurements based on the acoustic-optic technique[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(12): 1732-1734.
- [4] WEISBURG G, GARBAY F. Light scattering by surface tension waves [J]. American Journal of Physics, 1979, 47(4): 355-356.
- [5] 苗润, 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.
- [6] MIAO R C, YANG Z L, ZHU J T, et al. Visualization of low-frequency liquid surface acoustic waves by means of optical diffraction [J]. Applied Physics Letter, 2002, 80(17): 3033-3035.
- [7] DONG J, QI J X, MIAO R C. Measurement of the damping of liquid surface wace by diffraction method[J]. Brazilian Journal of Physics, 2007, 37(3B): 1129-1133.
- [8] ZHU F, MIAO R C, XU C L, et al. Measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser diffraction[J]. American Journal of Physics, 2007, 75(10): 896-898.
- [9] 刘香莲, 苗润才, 罗道斌, 等. 低频液体表面波衍射条纹的不对称性[J]. 激光技术, 2007, 31(6): 590-592.
- [10] 董军. 液体表面波衍射条纹的不对称性和弯曲液面的临界反射效应[D]. 西安: 陕西师范大学, 2006.
- [11] 苗润才, 滕晓丽, 叶青. 液体表面低频声波的非线性声光效应[J]. 光子学报, 2003, 32(10): 1264-1267.
- [12] 刘香莲, 苗润才, 李增生, 等. 激光衍射法测量液体粘滞系数[J]. 应用激光, 2008, 28(2): 145-149.
- [13] HARLAND A R, PETZING J N, TYRER J R. Visualising scattering underwater acoustic fields using laser Doppler vibrometry[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305(4/5): 659-671.
- [14] HE H J, FENG S S. Ultrashort Pulse Laser Used to Generate Sound under Water[J]. IEEE, 1999, 2(4): 336-337.