

文章编号: 1001-3806(2008)05-0496-03

光衍射法测量低频液体表面波衰减系数

祁建霞¹, 苗润才^{2*}, 董 军³

(1. 西安邮电学院 应用数学与应用物理系, 西安 710121; 2 陕西师范大学 物理与信息技术学院, 西安 710062; 3 西安邮电学院 电子与信息工程系, 西安 710121)

摘要: 为了对低频液体表面波的衰减系数进行测量, 利用液体表面波的光衍射方法, 得到了稳定、清晰的衍射图样, 并发现了衍射条纹强度分布与光斑入射点位置有关。对此进行了理论分析, 得到了衍射条纹强度分布与液体表面波振幅之间的解析关系式以及表面波振幅随距离变化的实验数据。结果表明, 可以根据衍射条纹的强度分布来测量液体表面波的衰减系数, 与经典流体力学理论相比较, 符合较好。这一结果对测量液体的物理参量是有帮助的。

关键词: 测量与计量; 衰减系数; 光衍射; 声表面波

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Measurement of damping constant of liquid surface wave at low frequency by light diffraction method

QI Jian-xia¹, MIAO Run-cai^{2*}, DONG Jun³

(1. Department of Applied Mathematics & Applied Physics Xi'an Institute of Posts and Telecommunications Xi'an 710121, China; 2 Institute of Physics and Information Technology Shaanxi Normal University Xi'an 710062, China; 3. Department of Electronics and Information Engineering Xi'an Institute of Posts and Telecommunications Xi'an 710121, China)

Abstract In order to measure the damping constant of the liquid surface acoustic waves at low-frequency, steady and visible diffraction patterns were obtained by means of diffraction method and it was found that the variation of intensity distribution was related with the position of light spot. After analyzing the relationship between the intensity distribution of the diffraction rings and the liquid surface wave amplitude, the damping constant was obtained. The experimental data are in good agreement with classic hydrodynamics theory, which proves that the diffraction method is applicable for measurement of liquid parameters.

Key words measurement and metrology; damping constant; light diffraction; surface acoustic wave

引 言

20 世纪 60 年代激光的问世, 使声表面波 (surface acoustic wave, SAW) 的光学可视化研究成为可能。这种方法是利用表面波对光的调制作用, 根据反射光或透射光强度分布与表面波的关系及表面波与表面物理参量之间的关系, 通过检测光强分布来研究表面物理特性。对于高频 SAW, 绝大部分研究是建立在声波光衍射效应的基础上。根据声光衍射原理, 如果 SAW 的频率较大, 则引起的衍射光角分离较大, 所以这类实验大多是针对超声表面波进行的^[1-7]。对于频率小于几

赫兹的液体 SAW, 通常采用激光表面波斜率扫描技术, 因为在这一频段, SAW 波长比扫描激光光斑大得多^[8-10]。尽管 BARTER^[11-12] 曾采用透射成像技术分析过这些频率下的 SAW, 但在他的研究中, 液体必须染色, 因此对像水这样的透明液体, 该方法就不太适用。为了克服这些问题, 作者建立了表面波激光干涉法测量技术^[13-14], 对几十赫兹的液体表面波进行了研究。而对于频率为几百赫兹的液体 SAW, SAKAI 曾采用过光外差法^[15]进行了研究, 但由于对实验设备要求甚高, 一般很难实现。MIAO 等人曾用衍射的方法进行过研究, 并且用这种方法测量液体表面的物理特性^[16-18]。作者利用光衍射方法, 研究了几百赫兹的液体表面波 (liquid surface wave, LSW), 实验上得到清晰、稳定的衍射图样。通过对衍射图样进行分析, 理论上得到了衍射图样的光强分布与液体表面波振幅之间的解析关系式。通过分析衍射图样光强分布与入射光斑位置的关系, 可以用来实时测量液体表面波的衰减系数。与经典流体力学理论相比较, 符合很好。

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金资助项目 (05JK322); 陕西省自然科学基金资助项目 (2003A12); 西安邮电学院中青年基金资助项目 (ZL2008-31)

作者简介: 祁建霞 (1980-), 女, 助教, 硕士研究生, 主要从事声光技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: rmc@snnu.edu.cn

收稿日期: 2007-07-04 收到修改稿日期: 2007-09-25

1 实验装置及现象

实验装置图如图 1 所示, 主要由 4 部分组成: 低频

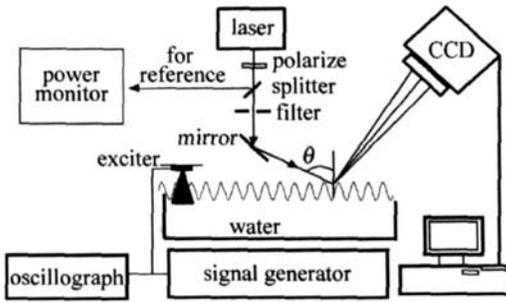


Fig 1 Schematic diagram of experimental setup

信号发生器、样品池、激光光源、光电数据采集和数据处理系统。低频信号发生器的输出驱动表面声波激发器, 在液体表面产生表面声波, 实验时信号发生器的输出在几百赫兹频段。表面声波激发器固定在 1 个可以上下左右调节位置的支架上, 以调节声波波源与入射光之间的距离及表面波的振幅。激光束的光斑直径约为 1.1mm, 因为激光束斜入射在液体表面, 所以液面上入射光斑为一椭圆形, 其长短轴分别为 5.8mm 和 1.1mm。长轴与表面波传播方向平行, 光斑大约照亮 2 个 ~ 3 个波形。实验中, 入射角大约为 1.435rad 激光波长为 473.0nm。激光束经分束镜分为 2 束, 其中 1 束用做参考光, 由功率计接收, 用来检测激光器输出功率是否稳定。另一束经小孔滤波器和反射镜后直接斜入射在液体表面上。入射点与观察屏间的距离为 8.56m, 满足夫琅和费衍射。在衍射光场中, 用 CCD 检测衍射图样, 并直接输入计算机存储和处理。CCD 的大小为 7.95mm × 6.45mm, 信噪比超过 48dB。本实验中所用液体为 2 次蒸馏水, 液体温度为室温 25℃。

在该实验中, 调节激发器水平位置旋钮, 改变入射点到激发波源之间的距离, 采集衍射图样。图 2 为 230Hz 时所拍摄的衍射图样。图 2a~图 2f 依次为表

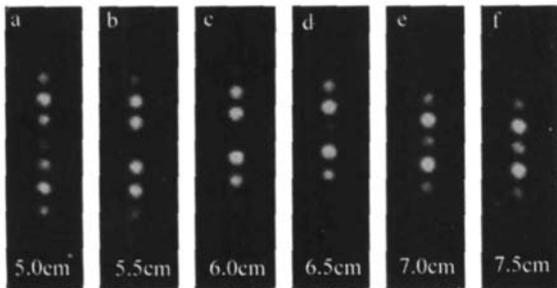


Fig 2 Diffraction patterns from the LSW at 230Hz on a water-air surface with different distance between the exciter and the light spot

面波激发器距光斑入射点 5.0cm, 5.5cm, 6.0cm, 6.5cm, 7.0cm, 7.5cm 时的远场衍射图。由实验结果看, 衍射条纹对比度非常高。且随着表面波激发器位

置的改变, 衍射条纹发生了改变, 而且各级条纹的强度分布也有变化, 会出现缺级现象。由于液体粘性的作用, SAW 的振幅会沿着波的传播方向发生衰减, 也就是说衍射条纹强度的变化与表面波的振幅有一定联系。因此, 可以通过分析衍射条纹强度的变化来研究振幅随距离的变化关系。

2 实验原理

激光照射在液体表面, 由于液体表面声波的存在, 反射光束的位相将受表面波的调制。尽管实际中表面粒子的运动呈椭圆形, 但仍可以把表面波近似为一正弦行波。如图 3 所示。

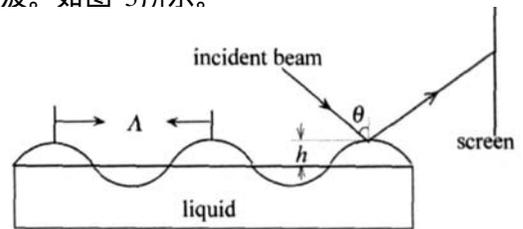


Fig 3 Principle of experiment

表面反射光的位相可以写成:

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} [2h \cos\theta \sin(\Omega t - kx)] \quad (1)$$

式中, h 代表表面波振幅; θ 是光束的入射角; λ 是光波波长; x 是波传播方向上的坐标; Ω 是表面波的角频率; t 表时间; k 是表面波的波矢量, 且 $k = 2\pi/\Lambda$, Λ 是表面波波长。根据傅里叶光学, 物函数可写为:

$$O(x) = \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\theta \sin\left(\Omega t - \frac{kx}{\cos\theta} \right) \right] \quad (2)$$

则衍射场中的光强分布可表示为:

$$I(x') = \sum_n J_n^2 \left(\frac{4\pi h \cos\theta}{\lambda} \right) \delta\left(\frac{x'}{\Lambda z} - \frac{n}{\Lambda \cos\theta} \right) \quad (3)$$

式中, x' 是观察平面的坐标变量, z 是入射点到观察平面之间的距离, J_n 是 n 阶第一类贝塞尔函数, $\delta(x)$ 是脉冲函数, 表征在 x 处函数值为无穷大, 在其它地方函数值为 0

由 (3) 式可以看出, δ 函数决定各级衍射图样的位置, 贝塞尔函数 $J_n\left(\frac{4\pi h \cos\theta}{\lambda}\right)$ 决定各级光斑光强的大小。对于不同的振幅 h , 光强 $\sum_n J_n^2\left(\frac{4\pi h \cos\theta}{\lambda}\right)$ 是不同的, 这就提供了一种表面波的振幅测量法。理论上可以通过 (3) 式求出任两级衍射图样的比值。实验上对同样的两级条纹进行扫描求出其强度比, 将理论和实验的比值相比较, 就可以得到某一位置处表面波的振幅。但当表面波振幅改变时, 衍射图样将会出现缺级现象, 可以直接根据 (3) 式进行求解此时表面波振幅。

这是因为(3)式中的贝塞尔函数 $J_n\left(\frac{4\pi h \cos\theta}{\lambda}\right)$ 决定第 n 级衍射条纹强度大小。例如信号发生器输出功率一定,由于表面波振幅沿着传播方向是减小的,当改变入射点位置,衍射图眼出现零级消失时,说明此时零阶贝塞尔函数 $J_0\left(\frac{4\pi h \cos\theta}{\lambda}\right) = 0$,通过求解,可以得出零级消失时的表面波振幅。在实验中,移动激发器,改变激发器与光斑之间的距离,采集图样。对这些图样进行分析处理,就可以得到不同位置处的振幅,进而求得表面波的衰减系数。

3 实验分析

根据上述方法,对图2进行分析,可测得各位置处表面波的振幅。图4为表面波振幅与距离的关系图。其中点为实验中所测的各位置处的振幅,实线为用最小二乘法拟合所得曲线。

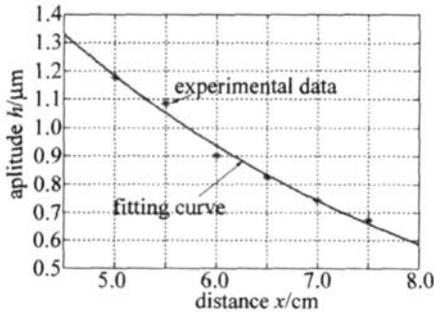


Fig 4 The SAW amplitude vs the distance at 230Hz

由上图可以看出,振幅 h 随着光斑与振子之间的距离 x 的变化而变化,当 x 较小时,即光斑距振子较近时,表面波振幅较大,随着距离 x 的增大,振幅在逐渐减小,而且这种变化近似是一种指数形式的衰减。振幅 h 与传播距离 x 之间的关系可以写作:

$$h = h_0 \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

h_0 是激发源处表面波的振幅, α 是表面波的衰减系数。为了简化运算,(4)式可写为:

$$\ln h = \ln h_0 - \alpha x \quad (5)$$

将实验中振幅取对数,做 $\ln h \sim x$ 图线,并用最小二乘法进行曲线拟合,如图5所示。

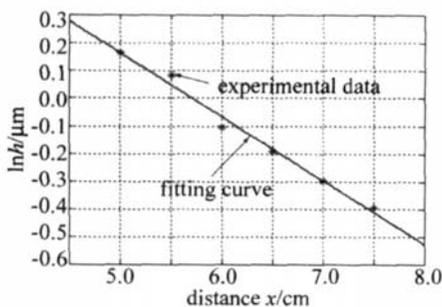


Fig 5 The logarithm of the amplitude vs the distance at 230Hz

由图5可以看出,拟合曲线为一直线,求解直线斜率,可得230Hz表面波衰减系数 $\alpha = 23.0 \text{ m}^{-1}$ 。

从理论上讲,表面张力波的空间衰减系数可近似为:

$$\alpha = 8\pi\nu\eta/3\sigma \quad (6)$$

式中, σ 为表面张力, ρ 为液体密度, ν 为液体黏性系数, f 为液体表面波的振动频率。对于25°C的蒸馏水而言, $\nu = 0.897 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho = 997.1 \text{ kg/m}^3$, $\sigma = 7.26 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ 。在230Hz时,可计算得 $\alpha = 23.7 \text{ m}^{-1}$,将实验数据与此理论结果比较,二者符合较好。

在实验中,运用衍射法测量了几百赫兹液体表面的衰减系数。图6为表面波衰减系数随频率的变化关系。其中*点为实验中所测出的各频率下的表面波衰

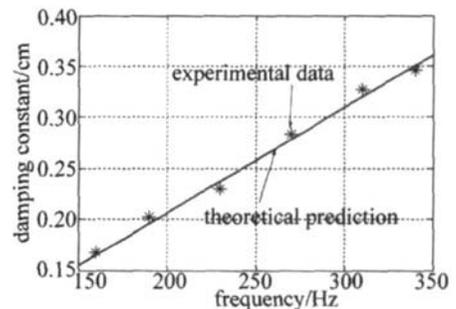


Fig 6 The damping constant vs frequency

减系数,实线为理论值。由图可知,衰减系数随着表面波频率的增加而增大,实验数据与理论结果符合很好。

4 结 论

利用光学衍射方法对低频液体表面波进行了研究。实验上得到了清晰、稳定的衍射条纹,并且发现,随着光斑入射点与激发器的距离改变,衍射条纹的强度分布也在发生变化。理论上对这一现象进行了研究,得到了条纹强度分布与表面波振幅之间的解析关系式。基于这一理论分析,可以根据不同位置处表面波的衍射条纹的强度分布,来对液体表面波的振幅进行研究。因此,提出了一种利用衍射方法来测量液体表面波的衰减系数的方法,实验测量值与经典流体力学理论值符合较好。而且利用此方法,进而根据(6)式还可以用来测量液体的粘滞系数。

参 考 文 献

- [1] DEVOLDER S, WEVER S M, de MEESTER D. Thin layer thickness measurements based on the acoustic-optic technique [J]. A P L, 1996, 68(12): 1732-1734
- [2] BR IER R, LEROY O. Surface roughness determination using the acoustic optic technique: theory and experiment [J]. A P L, 1997, 75(5): 599-601.
- [3] YAMANAKA K, CHO H. Precise velocity measurement of surface acoustic waves on bearing ball [J]. A P L, 2000, 76(19): 2797-2799

(下转第 520 页)

可行域内的最优模式控制电压。

4 结 论

提出了一种基于模拟退火算法的波前模式控制电压求解方法,通过在可行域内搜索可行解使得目标函数值趋于最小,最终获得 CMDM 的最优模式控制电压,其结果具有一定的全局最优性。该算法针对小形变量、镜面控制耦合的 CMDM,由于其波前复原的能力有限,高阶 Zernike 模式像差的复原容易使得模式控制电压超过变形镜的参量控制范围,简单剔除部分模式项或模式项组合不利于波前复原精度的提高,其结果降低了 CMDM 的波前复原能力。基于模拟退火算法的波前模式复原充分利用了现有变形镜的波前复原能力,在全局范围搜索最优多维控制电压组合,从复原结果可知,通过可行域内合适的影响函数线性组合可将入射畸变波前降到最小。

并且,由于变形镜影响函数的测量准确性制约着实际的自适应光学系统对波前畸变的校正效果。然而 CMDM 变形镜连续膜由于材料属性和力学结构等非线性因素的影响,无法用单一的线性公式去指代 CMDM 控制电极的影响函数。此日常用的直接法、闭环迭代等较难实现控制电压的求解。然而由于模拟退火方法可通过分段区域化、加权拟合等优化方式等影响函数非线性描述,从而也能获得最优模式控制电压。在此基础上,模拟退火算法可以结合最速下降、共轭梯度等局部搜索方法提高收敛速度,在自适应光学系统

具体应用中也存在一定的研究价值。

参 考 文 献

- [1] VDOV N G, M DDEIHOEK S, SARRO P M. Technology and application of micromachined silicon adaptive mirrors [J]. *Opt Engng* 2002, 23(3): 225-237.
- [2] YANG H F, JIANG Z F. Research of Zernike modal wavefront reconstruction of 19-element Hartmann Shack wavefront sensor [J]. *Laser Technology* 2005, 29(5): 484-487(in Chinese).
- [3] FANG D, CHEN H Q, LI J *et al*. The measurement of some important parameters of men's deformable mirror [J]. *Optical Instruments* 2005, 27(3): 21-27(in Chinese).
- [4] LI E D, DUAN H F, DAI Y, *et al*. Analysis of characteristics of micromachined membrane deformable mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2006, 18(7): 1099-1104(in Chinese).
- [5] JIANG Y S, WANG S, ZHAO D Z. Algorithm for wavefront reconstruction of micromachined adaptive optical system [J]. *Optical Technique* 2001, 27(3): 220-222(in Chinese).
- [6] LI E D, DAI Y, WANG H Y. Design of micromachined membrane deformable mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2006, 18(8): 1265-1271(in Chinese).
- [7] JIANG Y S, WANG S, ZHAO D Z. Algorithm of close loop control of micromachined adaptive optical system [J]. *Optical Technique* 2001, 27(3): 211-213(in Chinese).
- [8] ZHU J J, SUN P C, BARTSCH D U, *et al*. Adaptive control of a micromachined continuous membrane deformable mirror for aberration compensation [J]. *Appl Opt* 1999, 38(1): 168-176.
- [9] RAO X J, LIN J, JIANG W H. Experiment of measuring influence function of deformable mirror using digital interferometer [J]. *Acta Optica Sinica* 1995, 15(10): 1446-1450(in Chinese).
- [10] ZHOU R Zh. The adaptive optics theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996, 1-50(in Chinese).
- [11] KANG L Sh, XIE Y, YOU Sh Y, *et al*. The simulated annealing algorithm [M]. Beijing: Science Press, 1998, 3-75(in Chinese).
- [12] HUANG J, NISSEN J A. Diffraction of light by a focused ultrasonic wave [J]. *J A P*, 1992, 71(1): 70-75.
- [13] DUNCAN D B. Visualization of surface acoustic wave by means of synchronous amplitude modulated illumination [J]. *Appl Opt* 2000, 39(17): 2888-2895.
- [14] YAN G, XU X D, LU J *et al*. The influence of laser source on generated surface acoustic waves [J]. *Laser Technology* 2006, 30(3): 317-319(in Chinese).
- [15] ZHAO Y, SHEN Zh H, LU J *et al*. Laser thermoelastic generated surface acoustic waves on cylindrical coating-substrate system [J]. *Laser Technology* 2006, 30(6): 647-649(in Chinese).
- [16] BARTER J D, BEACH K L, LEE P H Y. Collocate and simultaneous measurement of surface slope and amplitude of water waves [J]. *Review of Scientific Instruments* 1993, 64(9): 2661-2664.
- [17] LEE P H Y, BARTER J D, BEACH K L, *et al*. Recent advance in ocean surface characterization by a scanning laser slope gauge [J]. *Proc SPIE*, 1992, 1749: 234-224.
- [18] LI Q X, ZHAO M, TANG S *et al*. Two dimensional scanning laser slope gauge measurements of ocean ripple structures [J]. *Appl Opt* 1993, 32(24): 4590-4597.
- [19] BARTER J D, LEE P H Y. Real time wave amplitude spectrum analyzer for air-liquid interfaces [J]. *A P L*, 1994, 64(15): 1896-1898.
- [20] BARTER J D, LEE P H Y. Imaging surface wave analyzer for liquid surfaces [J]. *Appl Opt* 1997, 36(12): 2630-2635.
- [21] MIAO R C, ZHAO X F, SHI J J. Measurement of low-frequency surface acoustic wave on liquid surface by means of laser interference [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2004, 31(6): 752-756(in Chinese).
- [22] MIAO R C, SHI J J, ZHAO X F. Determination of the attenuation coefficient of surface acoustic wave by means of the light interference [J]. *Acta Photonica Sinica* 2005, 34(3): 382-385(in Chinese).
- [23] SAKAI K, CHOIP K, TANAKA H, *et al*. A new light scattering technique for a wide-band ripplon spectroscopy at the MHz region [J]. *Review of Scientific Instruments* 1991, 62(5): 1192-1195.
- [24] MIAO R C, YANG Z L. Physical properties of liquid surface wave and its optical diffraction [J]. *Acta Physica Sinica* 1996, 46(9): 1521-1525(in Chinese).
- [25] 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]. *A P L*, 2002, 80(17): 3033-3035.
- [26] MIAO R C, TENG X L, YE Q. Nonlinear acoustic-optical effect from liquid surface waves at low-frequency [J]. *Acta Photonica Sinica* 2003, 32(10): 1264-1267(in Chinese).

(上接第 498 页)