

基于激光多普勒效应的液体表面波探测研究

张晓琳, 唐文彦*, 张春富, 王军

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了对低频液体表面波的频率和振幅进行测量, 利用多普勒相干测速的工作原理, 提出了一种液体表面散射激光与参考光相干涉的检测方法。对此进行了理论分析, 得到了多普勒频移与液体表面波振幅之间的解析关系式, 并利用贝塞尔函数分析了频谱分析图中解调出低频液体表面波频率的可行性, 设计并实现了一套液体表面波多普勒相干检测的实验装置。结果表明, 能够实时准确探测 10Hz ~ 40Hz 的液体表面波参量, 该方法为低频液体表面波的探测提供了新思路。

关键词: 激光技术; 激光探测; 多普勒效应; 液体表面波

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.018

Study on liquid surface wave detection based on laser Doppler effect

ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, ZHANG Chun-fu, WANG Jun

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

Abstract: To measure the frequency and amplitude of low-frequency liquid surface wave, a detection method based on the principle of Doppler interferometry for velocity measurement is proposed, which makes use of interference between laser scattered on liquid surface and reference beams. Theoretical analysis was carried out to achieve the analytical expression for Doppler shift and amplitude of liquid surface wave. Also, the feasibility of demodulating frequency of low-frequency liquid surface wave from the spectrum was evaluated with Bessel functions. A test system was designed and implemented for Doppler interferometry for liquid surface wave. The test results show that parameters of liquid surface wave at 10Hz ~ 40Hz can be measured accurately. This method provides a new solution for detection of liquid surface wave.

Key words: laser technique; laser detection; Doppler effect; liquid surface wave

引言

利用光学方法研究波动特性被广泛应用于流体力学、海洋光学、雷达散射、液体表面波研究领域^[1]。早在 1979 年, WEISBUCH 等人首次提出用液体表面波实现光的衍射光栅, 并以此建立了表面张力的光学测量方法^[2]。但研究的液体表面振幅比较小, 无法用肉眼看到它, 这给液体表面波性质的研究带来一定的困难。为解决这个问题, BEHROOZI 等人采用激光干涉方法精确地测定了水表面波的色散关系, 但其仪器比较复杂昂贵且不易搭建^[3]; BARIK 等人利用干涉水波通过测量其衍射光斑强度来研究水波结构^[4]。对于不同频段的液体表面波的测量有不同的方法, 频率为几百赫兹的液体表面波, SAKAI 曾采用过光外差法^[5]进行了研究, 但由于对实验设备要求很高, 一般

很难实现。MIAO 等人用衍射的方法测量几百赫兹的液体表面波的物理特性^[6-7], 实验观察到了表面波的衍射效应, 而且得到了几乎 100% 的衍射效率, 还讨论了衍射条纹间距与液体表面张力的关系, 并对液体表面波的衰减特性进行了研究^[8-9]。对于频率为几赫兹或更小的表面波, BARTER 等人曾采用表面波斜率激光扫描技术分析过这些频率下的液体表面波, 但在他的研究中, 液体必须染色, 不适用于像水这样的透明液体^[10-11]。对于几十赫兹频率的液体表面波的研究, MIAO 等人依据激光干涉测量方法, 理论上导出了调制干涉图样光强度、干涉条纹角宽度、干涉区域角宽度与表面声波之间的解析关系, 并在实验中观察到了反射光所形成的稳定清晰的调制干涉图样^[12-13]。基于激光多普勒效应, 作者提出了一种非接触式测量低频液体表面波振幅和频率的光学方法。采用多普勒相干测速的工作原理, 系统发出的相干激光束照射到液体表面, 液体表面波动使得散射光发生多普勒频移, 利用该频移和速度的关系推导出液体表面波的相关参量。并设计了一套实验装置, 实验结果表明, 可以准确测量

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。

* 通讯联系人。E-mail: tangwy@hit.edu.cn

收稿日期: 2009-02-09; 收到修改稿日期: 2009-04-24

出几十赫兹的液体表面波的振幅和频率。

1 实验装置

系统采用多普勒相干测速的工作原理,采取零差工作模式。实验装置如图1所示,低频信号发生器的输出频率在几十赫兹频段,驱动表面波激发器,表面波激发器在液体表面上产生表面波。液体样品为蒸馏水。

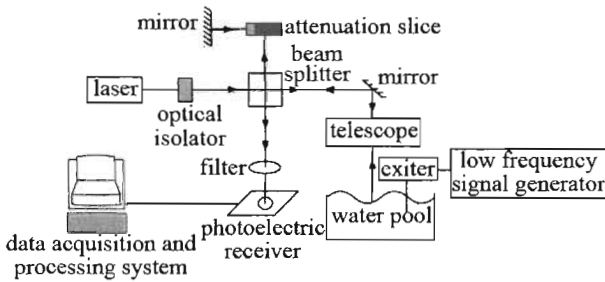


Fig. 1 Structure of experimental system

激光器采用 He-Ne 稳频激光器,输出的激光经过分光镜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液体表面。光隔离器的作用是有效阻止反射光返回激光器而影响其稳定性。衰减片可以削弱参考光的光强,使得参考光与信号光干涉效果明显。液体表面的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,解调后经过快速傅里叶变换即可获得液体表面波的频率,再利用多普勒频移和速度的关系式可以得到液体表面波的振幅。

系统的主要器件技术指标如表 1 所示。

Table 1 Specifications of system components

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
optical isolator	transmittance	>97%
filter	band width/nm	1
large-area photoreceivers	wavelength/nm	400 ~ 1070
	type	silicon
	diameter/mm	8
	gain/(V · A ⁻¹)	2 × 10 ⁶
	band width/kHz	90
A/D	sample rate/kHz	44

2 工作原理

当液体表面波动时,用激光照射波动的水面,则散射光中携带了液体表面波信息,令其与参考光干涉,光

程差随着液体表面波的振幅发生变化,从干涉信号中可以解调出液体表面波的频率和振幅信息。

为了不失一般性,假定液体表面波用 $y_s(t) = A_s \sin(2\pi f_s t + \varphi_s)$ 来表示, A_s , f_s 和 φ_s 分别表示液体表面波信号的振幅、频率和初相位。一个有限大小、具有多种频率的液体表面波只是在此基础进行的积分或叠加。那么,依据两束光相干的光强表达式,信号光与参考光干涉后的光强信息 I 用下式来表示:

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

式中, I_1 , I_2 分别为信号光和参考光的光强, λ 为光波波长, Δ 为光程差, $(L_1 - L_2)$ 为液体表面静止时信号光路与参考光路的初始行程差。令 $\varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda}(L_1 - L_2)$,

$$X = \frac{4\pi A_s}{\lambda}, \varphi_s = 0, \text{得到下式:}$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos [X \sin(2\pi f_s t) + \varphi_0] \quad (2)$$

将(2)式按照余弦两角和的公式 $\cos(\alpha + \beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta$ 展开,光强信号被光电接收器接收后,得到的交流光电信号 U 的表达式如下:

$$U = U_0 \{ \cos\varphi_0 \cos [X \sin(2\pi f_s t)] - \sin\varphi_0 \sin [X \sin(2\pi f_s t)] \} \quad (3)$$

式中, U_0 是交流光电信号的幅值。

由以下数学关系:

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

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

则可以将(3)式展成以振动频率 f_s 为基频的各次谐波项之和:

$$U = U_0 [\cos\varphi_0 J_0(X) - \sin\varphi_0 J_1(X) \sin(2\pi f_s t) + 2\cos\varphi_0 J_2(X) \cos(2\pi \times 2f_s t) - \dots] \quad (6)$$

式中, $J_n(X)$ 为第 1 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,对检测的波形做频率解调和频谱分析,即可获得液体表面波的频率。

相干激光束照射到被测液体表面,液体波动使得液体体表面的散射光发生多普勒频移,该频移 Δf 和液体表面振动速度 v 的关系为:

$$\Delta f = f_0 \left(1 - \frac{v \cdot e_0}{v_0} \right) \left[1 - \left(\frac{v \cdot e_0}{v_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (7)$$

式中, f_0 为激光频率, v_0 为介质中光速, e_0 为激光入射向量。当 $v \cdot e_0 \ll v_0$ 时,多普勒频移和物体振动速度呈

线性关系：
$$\Delta f = \frac{2v \cdot \cos\theta}{\lambda} \quad (8)$$

式中, θ 为运动方向和观察方向的夹角, λ 为激光波长。可以通过相干检测的方法测量多普勒频移, 从而获得物体振动速度 v , 而液体表面的振动速度 $v = 2\pi f_s A_s \cos(2\pi f_s t + \varphi_s)$, 里面包含了液体表面波信号的振幅值 A_s , 从而可以利用(6)式从测试到的多普勒最大频移值来计算 A_s 。

$$\Delta f_{\max} = \frac{2v_{\max}}{\lambda} = \frac{2\max[|2\pi f_n A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n)|]}{\lambda} \quad (9)$$

3 实验结果

按照图1的实验装置, 低频信号发生器给出频率为 10Hz ~ 40Hz 的标准正弦信号, 驱动表面波激发器, 表面波激发器在液体表面上产生表面波, 光学平台上搭建的干涉光路探测液体表面振动导致的光程差变化。实验目的是证明探测到的液体表面波频率和信号发生器设置的正弦信号频率的一致性, 从而验证该方法探测液体表面波频率的可行性。把采集到的数据做频率分析, 可以得到最大多普勒频移值, 从而计算出液体表面波的振幅。

图2是当低频信号发生器的频率为 30Hz 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液体表面起伏引起的。对这一相干

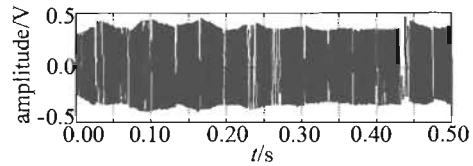


Fig. 2 Time-domain waveform

检测波形做消除趋势项以及平滑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 30.5Hz, 与频率低频信号发生器的频率基本一致。在 60Hz, 90Hz 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 f_s 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。

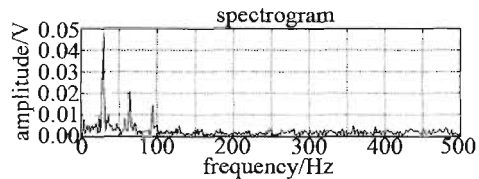


Fig. 3 Spectrum analysis

为了验证测量得到的峰值频率和信号发生器给定频率的一致性, 进行了多组比对实验。信号发生器给出频率范围为 10Hz ~ 40Hz, 频率间隔为 4Hz, 测量到的数据见表2。从多次实验结果可以看出, 最大标准偏差为 0.33Hz, 选取4组数据的平均值作为测量值, 与信号发生器给定频率作比较, 最大相对误差为 0.8%。

Table 2 Peak frequencies of spectrum

frequency of signal generator /Hz	peak frequency of spectrum/Hz				standard deviation/Hz	average /Hz	relative error/%
	group 1	group 2	group 3	group 4			
10	10.3	9.8	9.8	10.4	0.28	10.075	0.75
14	14.1	13.7	14.1	14.3	0.22	14.05	0.36
18	18.6	18.0	18.1	17.7	0.32	18.1	0.56
22	21.3	21.6	21.9	22.5	0.44	21.825	0.80
26	25.9	25.7	25.9	26.2	0.18	25.925	0.29
30	30.5	29.9	30.0	30.2	0.23	30.15	0.50
34	33.7	33.9	34.5	34.4	0.33	34.125	0.37
38	38.3	38.3	38.6	37.9	0.25	38.275	0.72

对于振幅的计算依据(9)式, 信号发生器给出频率范围为 10Hz ~ 40Hz, 频率间隔为 4Hz, 计算得到的液体表面波振幅在微米数量级, 数据如表3所示。

Table 3 Amplitude of liquid surface wave

frequency of signal generator/Hz	maximum Doppler frequency/Hz	amplitude of liquid surface wave/ μm
10	1396	7.029
14	1938	6.971
18	2449	6.851
22	2940	6.729
26	3428	6.639
30	3927	6.592
34	4402	6.520
38	4835	6.407

4 结论

实验中测得低频液体表面波振幅在微米数量级, 频率检测的实验结果和理论吻合较好。所测得的液体表面波频率并不是精确的等于低频信号发生器的给定频率, 主要原因有以下几点: (1) 水面的散射光及其微弱, 干涉效果受实验环境的影响较大(如杂光干扰); (2) 尽管采用蒸馏水作为样品, 但液面仍不是一种理想的气液两相面, 其它粒子悬浮于水面, 复杂的液面情况影响实验效果; (3) 引起液体表面波动的激发源是低频信号发生器, 其自身不稳定性影响到测量的实验

数据;(4)测得的频率值是数据处理软件给出的频谱峰值,采样、滤波等环节也会影响实验数据的精度。可通过改善实验环境条件,增强液体表面洁净度,使用更加稳定的激发源等方法使实验得到更好的效果。

参 考 文 献

- [1] ZHAO X F. Liquid surface wave and its optical measurement method [J]. Journal of Yulin College, 2007, 17(2): 34-36 (in Chinese).
- [2] WEISBUCH G, GARRBAY F. Light scattering by surface tension waves [J]. Amer J Phys, 1979, 47(4): 355-356.
- [3] BEHROOZI F, PERKINS A. Direct measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser interferometry [J]. Amer J Phys, 2006, 74(11): 957-961.
- [4] BARIK T K, ANUSHREE A, KAR S. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves [J]. Amer J Phys, 2005, 73(8): 725-729.
- [5] SAKAI K, CHOIP K, TANAKA H, et al. A new light scattering technique for a wide-band ripplon spectroscopy at the MHz region [J]. Rev Scien Instrum, 1991, 62(5): 1192-1195.
- [6] MIAO R C, YANG Z L. Physical properties of liquid surface wave and its optical effect [J]. Acta Physica Sinica, 1996, 46(9): 1521-1525 (in Chinese).
- [7] 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, 2000, 80(17): 3033-3035.
- [8] LUO D B, MIAO R C, LIU X L, et al. Study on diffraction and damping characteristics of low frequency liquid surface waves [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 584-586 (in Chinese).
- [9] QI J X, MIAO R C, DONG J. Measurement of damping constant of liquid surface wave at low frequency [J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 496-498 (in Chinese).
- [10] 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.
- [11] BARTER J D, LEE P H Y. Imaging surface-wave analyzer for liquid surfaces [J]. Appl Opt, 1997, 36(12): 2630-2635.
- [12] MIAO R C, ZHAO X F, SHI J. Measurement of low-frequency surface acoustic wave on liquid surface by means of laser interference [J]. Laser Technology, 2004, 31(6): 752-756 (in Chinese).
- [13] MIAO R C, SHI J, ZHAO X F. Determination of the attenuation coefficient of surface acoustic [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(3): 382-385 (in Chinese).

(上接第169页)

附近很小的范围内分布,很容易被背景覆盖,很难被发现。改变3CCD的焦距发现,以上现象只是在焦点附近、焦深范围内出现的。

参 考 文 献

- [1] LIU Z J, LU Q Sh, JIANG Zh P, et al. Study on damage effect in CCD detectors irradiated locally by laser [J]. Laser Technology, 1994, 18(6): 228-230 (in Chinese).
- [2] WANG J Q, LUO B Q, FANG Zh Y, et al. Study on laser beam combination by means of isosceles triangle phase grating [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 561-564 (in Chinese).
- [3] NI X W, LU J, HE A Zh. Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices [J]. Laser Technology, 1994, 18(3): 153-156 (in Chinese).
- [4] ZHONG H R, LU Q Sh, LU Z J, et al. Review on the laser-induced damage mechanism of CCD detector [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(4): 537-542 (in Chinese).
- [5] SUN Y Q, CHENG X A, WANG F. Method of quality evaluation aimed at laser-disturbing image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 659-662 (in Chinese).
- [6] ZHANG Zh, CHEN X A, JIANG Zh F. Excessive saturation effect of visible light CCD [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6): 917-920 (in Chinese).
- [7] GUO Sh F, CHENG X A, BO X Q, et al. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1783-1786 (in Chinese).
- [8] LI F M, NIXON O, NATHAN A. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2004, 51(12): 2229-2236.
- [9] TIAN Y X. Fourier transformation and its application in Fraunhofer diffraction by circular aperture [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(1): 106-113 (in Chinese).
- [10] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 371-380 (in Chinese).