

文章编号: 1001-3806(2011)05-0600-03

## 利用激光多普勒外差原理对振动物体测量及分析

霍雷, 曾晓东\*, 安毓英, 冯喆珺, 曹长庆  
(西安电子科技大学 物理技术学院, 西安 710071)

**摘要:** 为了测量低频振动物体频率和振幅, 采用激光多普勒测量和外差相干检测方法, 建立一个利用激光外差干涉技术测量多普勒效应的实验, 进行了理论分析和实验验证, 取得了频率标准偏差数据。结果表明, 系统检测物体振动频率, 并对振源频率 500Hz 进行测量并且验证有效性, 测量标准偏差小于  $5.6 \times 10^{-8}$ ; 系统信号探测强度和物体振幅呈线性关系, 证明随压电陶瓷电压降低探测振幅强度减小。这一结果对了解振动目标特性是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 外差探测; 多普勒效应; 外差干涉; 频移

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.007

### Vibration measurement and analysis by means of laser Doppler heterodyne principle

HUO Lei, ZENG Xiao-dong, AN Yu-ying, FENG Zhe-jun, CAO Chang-qing  
(Institute of Physics and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Laser Doppler measurement methods and coherent heterodyne detection were adopted to measure the frequency and amplitude of low frequency vibration. An experiment setup was built, based on which the Doppler effect was measured with a heterodyne laser interferometer and the standard frequency deviation was obtained. The results shows that the system can detect the object vibration at less than 500Hz frequency, and the measurement standard deviation is less than  $5.6 \times 10^{-8}$ ; The strength of the system detection signal is linear with the amplitude of object, demonstrating that the intensity detection amplitude reduces with the drop of the voltage of the piezoelectric ceramic. The result is helpful to know the characteristics of vibration targets.

**Key words:** laser technique; heterodyne detect; Doppler effect; heterodyne interference; frequency shift

## 引言

多普勒效应是指当波源与观察者的相对位置发生变化的时候, 观察者接收到波的频率会发生变化的现象。多普勒效应已被广泛地应用于科学技术的多个领域, 如多普勒雷达、多普勒声纳和多普勒测速等<sup>[1]</sup>。作者在实验室环境下建立一个激光为载体的多普勒效应实验系统, 再次验证多普勒效应的同时, 也为后续实验打下基础。

与以前的试验系统比较, 本次实验中利用压电陶瓷装置实现了反射镜振动的多普勒频移, 探测器经滤波放大器直接与调频收音机连接, 利用了广播接收系统的可靠和稳定特性, 实现解调后以音频形式输出<sup>[2-5]</sup>。本实验中用声光调制器使光源在本振基础上产生一个 100MHz 的频移, 利用马赫-曾德尔干涉结

构, 电机驱动压电陶瓷使反射镜匀速振动产生多普勒频移, 利用光电探测器探测外差信号经过滤波器放大器和收音机解调后, 最终进入振动分析仪进行实验数据的实时采集<sup>[6-10]</sup>。整个实验利用激光外差原理测量多普勒效应。为了更精确地描述振动测量模型, 本文中通过分析激光外差干涉仪的测量原理, 从激光外差干涉仪多普勒频移公示出发, 推导出测量模型, 并将以测量数据结果进行对比, 指出两者差异并进行仿真<sup>[11-13]</sup>。

## 1 实验原理

激光外差干涉的测量原理如图 1 所示。入射光信号经分束器 1 分成两路。一路经分束器 2 和本振参考光 1 一并投射到探测器 1 上, 另一路经分束器 3 和 180°相移的本振参考光 2 一并投射到探测器 2 上。两个探测器的输出信号(相位相反)一同进入合成器再输出中频信号<sup>[1]</sup>。激光光源发出两束振动方向互相垂直频率分别为  $f_1$  和  $f_2$  的线偏振光, 通过分光镜 1, 一部分光通过进入光电探测器 2 上形成参考信号。外差检测是将频率  $f_s$  的激光多普勒信号与经过声光调制

作者简介: 霍雷(1983-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光外差探测方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xdzeng@xidian.edu.cn

收稿日期: 2010-11-24; 收到修改稿日期: 2010-12-13

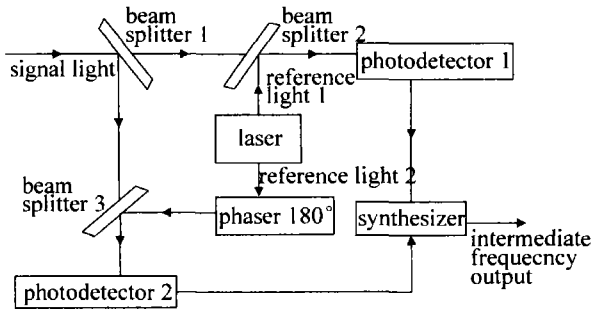


Fig. 1 Laser heterodyne interferometer schematic

器的频率  $f_r + f_a$  的本振激光进行混频,探测器出差频  $\Delta f_d$ ,经过高通滤波器消除直流漂移和放大器使信号放大后,鉴频获得多普勒频移  $\Delta f_D$  [3]。

激光多普勒测振动采用多普勒相干测速的工作原理 [2],系统发出的相干激光束照射到被测物体表面,表面振动使得物体表面的散射光(信号光)发生多普勒频移。该多普勒频移  $\Delta f_D$  和物体表面振动速度  $v$  的关系为:

$$\Delta f_D = f_0 \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \quad (1)$$

式中,  $f_0$  为激光频率,  $c$  为介质中光速,  $v$  为物体表面振动速度。当  $v \ll c$  时,多普勒频移和物体振动速度呈线性关系:

$$\Delta f_D = \frac{2v \cdot \cos\theta}{\lambda} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为运动方向和观察方向的夹角,  $\lambda$  为激光波长。可以通过相干检测的方法测量多普勒频移,从而获得物体方面振动速度。

对于做简谐振动的物体,其表面的速度随振动频率做周期性变化,对检测的波形做频率解调,再做频谱分析,就可以获得物体表面的振动频率,从而得到物体的振动速度。

## 2 系统设计

系统采用外差工作模式,旨在验证测量物体表面振动的可行性。主要模块包括单模半导体抽运激光器、分光器、声光调制器、压电振动镜、光电探测器、信号滤波器和振动分析仪,外加一个调频收音机。从 Verdi 公司单纵模半导体抽运激光器输出激光(波长  $\lambda = 532\text{nm}$ ,光频率  $f_l = c/\lambda$ ,频率单位:Hz)经分光器分为两束:一束经分光器射向光电探测器,其频率仍为  $f_l$ ,称为本机振荡光束;另一束在通过声光调制器移频后经反射镜反射,由于多普勒效应,频率变为  $f_s$ ,称为信号光束。信号光束经分光器也射向光电探测器。信号光束和本振光束满足相干条件,必然在光敏面发生干涉(光混频),直接检测相干信号。检测到的相干信号通过信号滤波器和信号放大器处理,在调频收音机

解调后经过快速傅里叶变换分析获得振动频率,即可算出振动表面的运动速度。

## 3 实验结果

按照图 2 的实验装置,在光路中安装压电陶瓷振镜,压电陶瓷带动反射镜振动导致相位变化。实验首先验证激光多普勒方法与振动物体的频率和强度测量的一致性,从而验证激光多普勒振动应用于空间光通信的可行性。

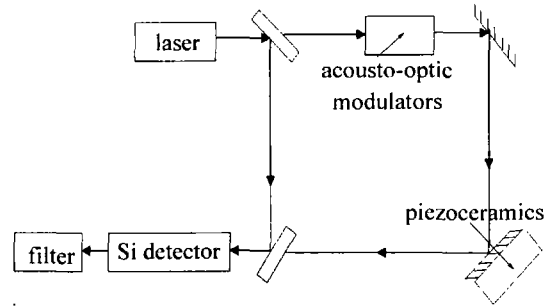


Fig. 2 Structure of laser Doppler vibrometer

系统采用外差工作方式,通过声光调制器调制光束,达到频移的效果,光电探测器接受外差干涉信号。图 3a 是反射镜以频率 500Hz 振动,本振参考光束和信号光束相干检测到的时域波形,时间约为 100ms。图 3b 是时域放大后的波形图。图 4 是该段数据解调并滤波后的波形,经过快速傅里叶变换转换频率为 500Hz。

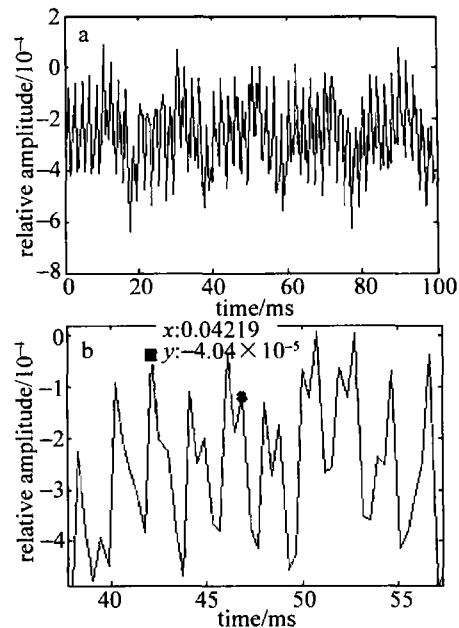


Fig. 3 Time series waveform of output intensity  
a—(0~100)ms b—(40~55)ms

为了检验测量频率和反射镜振动频率的一致性,进行了激光多普勒振动频率和反射镜振动原始频率的测量比较。压电陶瓷产生频率范围为 0.1kHz~1kHz,振动频率间隔 1s,频谱的振动测量对比如图 5 所示。

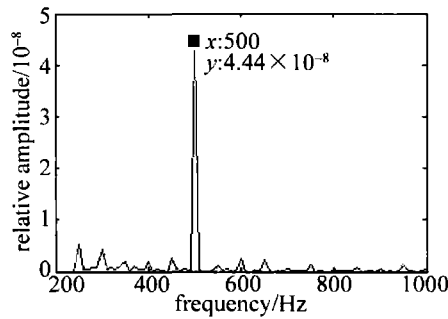


Fig. 4 Chart of vibration frequency measurement

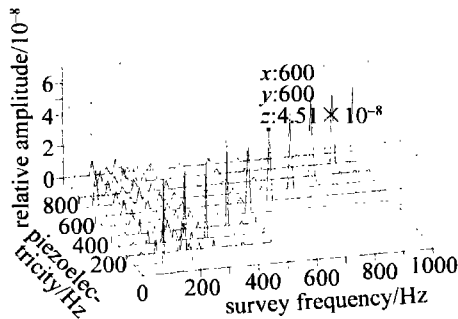


Fig. 5 Output spectrum of laser Doppler effect frequency of source

图5横坐标对应实验测量频率,纵坐标对应压电陶瓷振源频率,竖坐标表示相对振幅,如图绘制出激光多普勒效应测量频谱。可以看出,激光多普勒测量频谱中的最高频率分量与压电陶瓷振源频率一致。

然后,对上述反射镜振动频率用激光多普勒测量方式进行多组探测,测得频率数据的标准偏差如图6所示。图中横坐标为探测的振动频率,纵坐标为测到频率标准偏差,其中9个频率的测量值标准偏差小于 $5.6 \times 10^{-8}$ 。因此,说明通过激光多普勒测量方式可以较准确获得物体的振动频率。

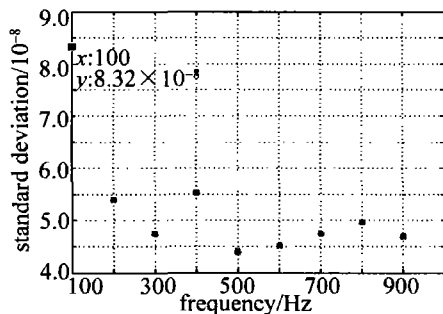


Fig. 6 The standard deviation of frequency data

针对振动频段在500Hz和1kHz分别做了激光多普勒灵敏度探测实验。对于压电陶瓷分别在500Hz和1kHz振动频率引起的反射镜振幅测量如图7所示。图7a和图7b的横坐标为压电陶瓷所加电压,纵坐标为激光多普勒测量的相对振幅。图中数据点为在不同电压下激光多普勒测量到的物体振动的相对振幅,图中划线为数据点的连接,表明随振源振幅降低,探测到的信号强度呈线性递减。

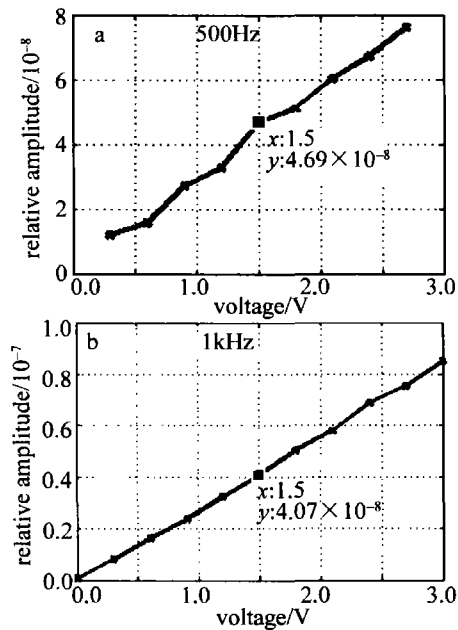


Fig. 7 Output intensity of laser Doppler measure versus vibration at 500Hz and 1kHz

## 4 结论

实验表明,应用激光多普勒外差可以测量物体表面的振动频率,能够绘制物体发出的振动频谱,本系统对振动频率的测量标准偏差小于 $5.6 \times 10^{-8}$ 。探测信号强度和振幅成线性关系。对500Hz和1kHz振动频率分别进行试验,证明随压电陶瓷电压降低,探测振幅相应减小。结果对了解振动目标特性有帮助。

## 参考文献

- [1] AN Y Y, ZENG X D. Optical detection principle[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004:56-72 (in Chinese).
- [2] WANG Y, CHEN J B, ZHUANG S L. Experimental verification of laser Doppler effect[J]. Laser Technology, 2010, 34(2):170-172 (in Chinese).
- [3] ZHANG X L, TANG W Y. Study on liquid surface wave detection based on laser Doppler effect[J]. Laser Technology, 2010, 34(2):210-213 (in Chinese).
- [4] BARIK T K, ANUSHREE A, KAR S. A simple experiment on diffraction of light by interfering liquid surface waves[J]. American Journal of Physics, 2005, 73(8):720-730.
- [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]. Review of Science Instrument, 1991, 62(5):1190-1193.
- [6] ZHONG Zh, TAN J B. Study on fast ultra-precision measurement model in laser heterodyne interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6):791-794 (in Chinese).
- [7] DUTTON D, GIVENS M P, HOPKINS R E. Some demonstration experiments in optics using a gas laser[J]. American Journal of Physics, 1964, 32(5):355-361.
- [8] HARIHARAN P, WARD B. Interferometry and the Doppler effect an experimental verification[J]. Journal of Modern Optics, 1997, 44(2):

(下转第687页)

化参量。分两种情况测试,如表2所示,以1和0分别表示与五粮液分为同类和异类。情况一是以荧光峰个数、最佳激发波长和主荧光峰的峰值波长作为输入变量时,茅台醇和五粮液2均被识别为五粮液1;情况二是以本文中提取的全部特征参量作为输入变量时,唯有五粮液2被识别为五粮液1。测试结果表明,增加线宽特征参量是有必要的,可提高识别精度,从而将五粮液和其它白酒较好地区分开来。

Table 2 Results of identification

test samples	situation 1	situation 2
52% vol Wuliangye 2	1	1
45% vol Maotaichun	1	0
56% vol Beijingeruotou	0	0
50% vol Gaogou	0	0
42% vol Jiuzhongwang	0	0

### 3 结论

由理论和实验结果表明,白酒成分及含量的不同是荧光光谱特征存在差异的根本原因,同一香型派别的白酒其荧光光谱具有较大相似性;运用所提取的荧光峰个数、主荧光峰的峰值波长和最佳激发波长以及主荧光峰的线宽特征参量,可以较好地区分不同品牌同一香型派别的白酒;且提取参量过程为计算机处理,克服了人工方法低效率的缺点。研究表明,运用荧光光谱特征参量识别白酒五粮液是可行的,这为白酒的识别提供了一种较为便捷的有效方法。

#### 参 考 文 献

- [1] YANG J L, ZHU T, XU Y, *et al.* Study on ultraviolet fluorescence spectra of monomers of distilled spirits[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009,29(12):3339-3343(in Chinese).
- [2] SHAO Ch J, LI G, LI L, *et al.* Investigation on liquor flavor types and flavoring components[J]. Liquor-making Science & Technology, 2005(8):92-93(in Chinese).
- [3] GU E D, SHI A M, ZHU T, *et al.* Study on three-dimensional fluorescence spectra of yanghe classical distilled spirits[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(12):2916-2920(in Chinese).
- [4] ZHU T, CHEN G Q, YU R P, *et al.* An experiment study of methanol absorption and fluorescent spectra induced by UV-light[J]. Laser Technology, 2006,26(2):291-294(in Chinese).
- [5] LAN X F, LIU Y, GAO Sh M, *et al.* Analysis of fluorescence spectra of alcohol and its characteristic[J]. Laser Technology, 2003,32(4):477-479(in Chinese).
- [6] YANG J L, ZHU T, WU H. Cluster analysis of distilled spirit based on three-dim fluorescent spectra[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009,20(4):495-498(in Chinese).
- [7] YANG J L, ZHU T, XU Y, *et al.* Application of three-dimensional fluorescence spectra technique to discrimination of distilled spirits based on support vector machines[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010,30(1):243-246(in Chinese).
- [8] CHEN Y H, SHEN R F, CHEN H H. In graphite oven atom absorption spectrographic methods for determination of white liquor lead[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2008,18(9):1778-1779(in Chinese).
- [9] WANG L, JI K L, XU Y. Near infrared spectroscopy and its application prospect in quality control of liquor[J]. Liquor-making, 2005,32(5):17-19(in Chinese).
- [10] LI CH W, WEI J P, SUN S Q, *et al.* Identification of maotai-flavor liquors by FT-IR [J]. Liquor-making Science & Technology, 2006(11):56-58(in Chinese).
- [11] CHENG J S. Determination of flavoring compounds in liquor by gas chromatography [J]. Liquor-making Science & Technology, 2006(8):104-107(in Chinese).
- [12] FENG X D. Determination of the content of lactic acid & acetic acid by HPLC [J]. Liquor-making Science & Technology, 2009(5):115-116(in Chinese).
- [13] FRANCIOSO L, BJORKLUND R, KRANTZ-RULCKER T, *et al.* Classification of multiple defect concentrations in white wine by platinum microelectrode voltammetry[J]. Sensors and Actuators B, 2007(125):462-467.
- [14] XU J G, WANG Z B. Fluorimetry [M]. Beijing: Science Press, 2006:15-16(in Chinese).
- [15] CHEN G Q. Studies on application of fluorescence spectroscopy in food safety supervision[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010: 63-79(in Chinese).
- [16] VAPNIK V. Statistical learning theory[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1998: 401-567.
- [9] JOO K N, ELLIS J D, SPRONCK J W, *et al.* Simple heterodyne laser interferometer with subnanometer periodic errors[J]. Optics Letters, 2009,34(3):386-388.
- [10] CHEN Z F, LU H B, ZHANG Sh Z. A novel wide range nano-resolution ultra-precise diameter measurement instrument[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2001,37(4):32-34(in Chinese).
- [11] CHU X Ch. Research on key technology of nanometer displacement measurement by grating [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005:12-14(in Chinese).
- [12] XU D M, WENG C F, LEI M R. Research on the high accuracy displacement measuring and display system[C]//Chinese Society Modern Technology Equipment 7th International Symposium on Test and Measurement. Beijing: International Academic Publishers, 2007:3515-3518(in Chinese).
- [13] CHAN H M, YEN K S, RATNAM M M. Crack displacement sensing and measurement in concrete using circular grating Moiré fringes and pattern matching [J]. Proceedings of SPIE, 2008,7155:715529/1-715529/8.

(上接第602页)

221-223.