

文章编号: 1001-3806(2010)02-0170-03

激光多普勒效应的实验验证

王燕^{1,2}, 陈家璧^{1*}, 庄松林¹

(1. 上海理工大学 光电学院, 上海 200093; 2. 江西师范大学 理电学院, 南昌 330022)

摘要: 为了研究激光多普勒效应, 建立了一个简单的利用激光外差干涉技术测量多普勒效应的实验验证系统。由实验可知, 对于 0.2mm/s 的均匀速度, 理论上的拍频值为 316.0556Hz, 实验测量值为 312.0434Hz; 对于 0.1mm/s 的均匀速度, 理论上拍频值为 158.0278Hz, 实验测量值为 151.6055Hz。结果表明, 该验证系统的有效性, 可为光学实验教学中实现激光多普勒效应提供有益的帮助。

关键词: 激光光学; 多普勒效应; 外差干涉; 拍频; 频移

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.008

Experimental verification of laser Doppler effect

WANG Yan^{1,2}, CHEN Jia-bi¹, ZHUANG Song-lin¹

(1. College of Optics and Electronic Information Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: In order to study laser Doppler effect, a simple experimental system was set up to measure Doppler effect by means of laser heterodyne interferometer technique. Two sets of experimental data were obtained. At 0.2mm/s of uniform moving velocity, the theoretical and tested beat frequency is 316.0556Hz and 312.0434Hz respectively. At 0.1mm/s of uniform moving velocity, the theoretical and tested beat frequency is 158.0278Hz and 151.6055Hz respectively. Measurement results clearly show the effectiveness of the proposed setup and the simple optical system would be a new and interesting aid for the experiment teaching of classical optics.

Key words: laser optics; Doppler effect; heterodyne interferometry; beat frequency; frequency shift

引言

多普勒效应是奥地利物理学家及数学家多普勒于 1842 年首先提出来的。该效应是指当波源与观察者的相对位置发生变化的时候, 观察者接收到的波的频率会发生变化的现象。多普勒效应^[1-7]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、多普勒 B 超、多普勒测速仪、多普勒计程仪等。作者建立了一个简单的激光多普勒效应的实验验证系统, 可为光学实验教学中实现激光多普勒效应提供有益的帮助。

相较于以前的实验系统^[1], 其实验装置用迈克尔逊干涉结构实现了移动镜的多普勒频移测量, 探测器

经音频放大器直接与麦克风连接用声波演示; 参考文献[2]中则用声光调制器产生一个 80MHz 的频移。随着现代科学技术的发展, 实验设备精度、性能的提高, 本文中的实验采用马赫-曾德尔干涉结构, 用伺服电机驱动的电移台控制直角棱镜匀速移动产生频移, 用 1 块 AC6611 数据采集卡直接连接电脑进行实验数据的实时采集, 实验测量结果清楚地表明了所建立的外差干涉^[5, 8-10]实验系统测量激光多普勒效应的有效性。

1 实验原理

人们知道, 无论光源或探测器或介质只要有一个运动时就会产生多普勒效应。当介质沿着离开光源的出射方向运动时, 这时返回光源的光的频率据波动理论^[3]知其公式为:

$$f' = f_0 \left(\frac{c - v}{c + v} \right) \quad (1)$$

式中, f_0 是光源的频率, c 是光的速度, v 是介质的移动速度。

将多普勒原理应用于如图 1 所示的光学系统, 光

基金项目: 国家九七三重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB935303); 国家自然科学基金资助项目 (60778031); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20050252004)

作者简介: 王燕 (1979-), 女, 讲师, 博士研究生, 现主要从事光学测量的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jbchen@online.sh.cn

收稿日期: 2008-12-29; 收到修改稿日期: 2009-02-23

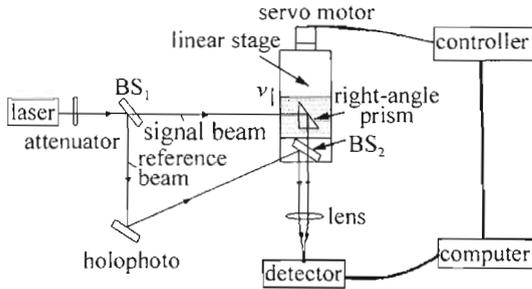


Fig. 1 Schematic setup of the optical system for experimental verification of Doppler effect

源和探测器是静止的。对于这种特定情况,只需简单地应用3次(1)式即可,即存在3次多普勒现象。考虑到信号光、参考光的频率及直角棱镜的移动速度,最后可计算出该系统的多普勒拍频公式为:

$$\Delta f |f_s' - f_r'| = f_0 v/c = v/\lambda \quad (2)$$

$$f_s' = f_0 \left(\frac{c + nv \tan \theta}{c - nv \tan \theta} \right) \left(\frac{c - nv}{c + nv} \right) \left(\frac{c + v}{c - v} \right) \approx f_0 \left(1 + \frac{v \tan \theta}{c} n - \frac{v}{c} n + \frac{v}{c} \right) \quad (3)$$

$$f_r' = f_0 \quad (4)$$

式中 f_s' 和 f_r' 分别代表信号光和参考光的频率, n 为棱镜的折射率, v 是棱镜的移动速度, $\theta = 45^\circ$, λ 是光源在自由空间中的波长。其中信号光由于经过棱镜反射,因其移动产生了多普勒频移,参考光频率保持不变。由于光波在空气中的传播速度很大,而棱镜的运动速度很小,所以,对信号光多普勒频移的计算过程中进行了简化。从(2)式可知,拍频正比于棱镜的移动速度,信号光频率太大无法用探测器直接探测,但该拍频值可用外差干涉技术探测。

2 实验装置及结果

采用马赫-曾德尔干涉仪型^[5]结构,所建立的激光多普勒效应实验验证系统的光学系统结构见图1。

为了确保机械稳定性,整个实验系统放置在光学平台上。包括有 He-Ne 激光源、分束镜 (beam splitter, BS)、全反镜、用伺服电机驱动的电移台及控制器、直角棱镜、透镜、硅探测器和计算机。实验中所用的激光是 250B 型的 He-Ne 气体激光器,输出单模 TEM₀₀ 模式,工作波长为 0.6328 μm。从激光源出射的光首先通过一衰减器然后被分束镜 BS₁ 分成等强度的两束光,即分成信号光束和参考光束如图 1 所示。信号束垂直射向直角棱镜的一直角边被其沿垂直方向反射出去,再通过分束镜 BS₂; 参考束则经全反镜及分束镜 BS₂ 两次反射后与信号束一起垂直射向透镜镜面,最后在透镜的焦点处放置硅探测器,探测器的接收面垂直于直角棱镜的移动方向,其光敏面直径为 1mm。因为棱镜安置在用伺服电机驱动的电移台上,故设置控

制器参量使电移台匀速运动则可使棱镜做相应速度的移动,由此导致信号光束的光程发生变化。据多普勒效应可知,信号束的频率也按(3)式发生相应的变化,而单独测量该频率值现还没有可用的探测器,所以,用马赫-曾德尔干涉测量技术测量两束光的拍频,以验证多普勒效应的存在随棱镜移动速度之间的关系。

实验过程中耐心调节两束光的俯仰一致,在经过分光镜 BS₂ 时使两束光重叠,因两束光是从同一光源发出的,可知是相干光,这时可在纸片上看到干涉条纹,微调两束光的俯仰及左右直至在纸片上只出现一个明亮的圆斑。当棱镜每移动半个波长时,可看到条纹由亮至暗的变化。加透镜的目的是当棱镜运动后,

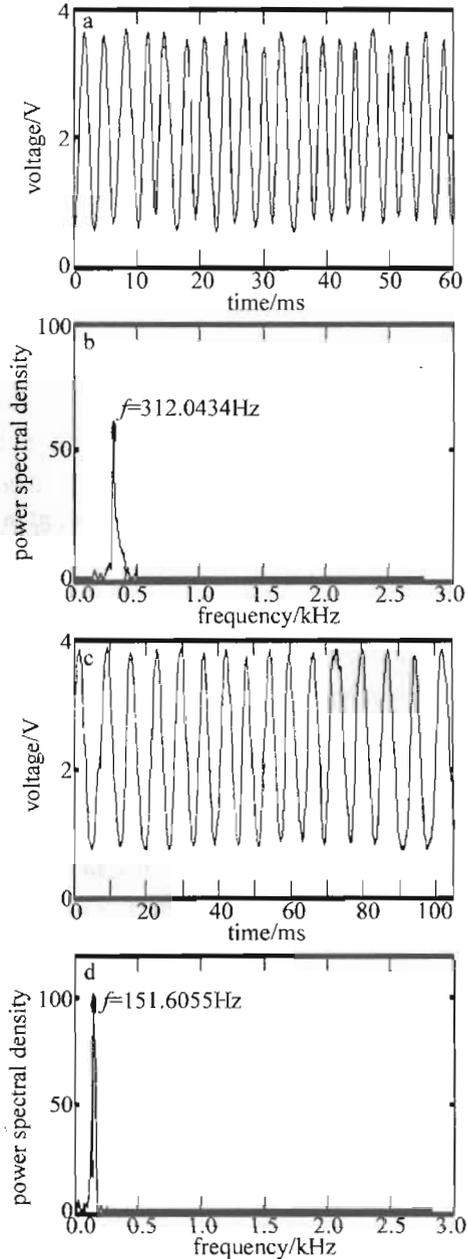


Fig. 2 The output signal and its power spectral density when the velocity of the prism was changed

a, b— $v=0.2\text{mm/s}$ c, d— $v=0.1\text{mm/s}$

信号光出射位置变化能用其合束再次聚焦在同一点上。探测器接收的信号即多普勒拍频信号,被探测器转化成 0V ~ 10V 的电压输出,最后经数据采集卡 AC6611 进行模数转换,用自行编制的程序进行数据的采集,并显示在电脑屏幕上实时观测结果。

探测器采集的信号和对收集的信号用快速傅里叶变换方法分析的信号功率谱密度见图 2。功率谱密度图中所显示的峰值即代表了实验测量得到的拍频信号。用上述的实验系统进行了低速情况的测量。所探测到按正弦规律变化的光强与理论值几乎是一致的。据(2)式计算可知,对于 0.2mm/s 的均匀速度,理论上的拍频值为 316.0556Hz,实验测量值是 312.0434Hz;而对于 $v=0.1\text{mm/s}$,理论上 $\Delta f=158.0278\text{Hz}$,实验测量值是 151.6055Hz。由于直角棱镜作匀速运动,从而使 Δf 保持恒定。故从实验测量结果知道理论与实际测量的一致性。测量结果表明,棱镜移动速度的不同导致了多普勒频移的不同,故由拍频值可反过来测量移动速度和移动距离等参量,进行定量测量。但由于干涉测量的灵敏性,实验过程中要注意防震,需对光学平台充气,否则得不到满意的结果。

3 结 论

建立了一个简单的激光多普勒效应实验验证系统。该系统用伺服电机驱动的电移台可提供直角棱镜非常慢的均匀速度。测量结果清楚地表明了所提供的光学

系统进行激光多普勒效应外差干涉测量的有效性。该实验装置简单、调整方便、演示效果明显,可为光学实验教学实现激光多普勒效应提供有益的帮助。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] HARIHARAN P, WARD B. Interferometry and the Doppler effect an experimental verification [J]. *Journal of Modern Optics*, 1997, 44(2): 221-223.
- [3] SHEN X. Laser Doppler velocity testing technology and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-9 (in Chinese).
- [4] JOO K N, ELLIS J D, SPRONCK J W, *et al.* Simple heterodyne laser interferometer with subnanometer periodic errors [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 386-388.
- [5] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 289-299 (in Chinese).
- [6] ZHU D H, ZHANG X H. Ship wake detection based on laser Doppler effect [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 298-300 (in Chinese).
- [7] WANG X Q, DONG Y Q, YUAN Sh, *et al.* Study on simulation of micro-Doppler effect in lidar [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 117-119 (in Chinese).
- [8] ZHONG Zh, TAN J B, MA H W, *et al.* Study on fast ultra-precision measurement model in laser heterodyne interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 791-794 (in Chinese).
- [9] CHEN H F, DING X M, ZHONG Zh. High acceleration ultra-precision measurement model in laser heterodyne interferometry [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2007, 34(8): 72-75 (in Chinese).
- [10] LI X F, WANG Ch, XIANG H B, *et al.* Detection of weak ultrasonic signal using optical heterodyne interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(7): 9510-9514 (in Chinese).