

文章编号: 0253-2239(2003)01-71-04

面内位移测量的激光多普勒信号研究*

贺顺忠 刘彦宇 蒋诚志 陈林才 姚欣

(天津大学测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在利用激光多普勒效应进行远距离处固体面内位移测量时, 散射光的多普勒信号强度、信噪比及信号质量是位移测量的极重要参量, 它们直接影响位移测量的距离和精度。为此研究了激光多普勒差分方法、锁相放大、数字滤波等技术, 设计出能获得最好结果的差分光路以及高灵敏度、高 Q 值的锁相放大器 and 能重构丢失信号的同态滤波系统等, 实现了 50 m 处固体面内位移测量, 其最大相对误差可以达到 1.5%。

关键词: 信息处理技术; 多普勒效应; 面内位移; 锁相放大

中图分类号: TB92 文献标识码: A

1 引 言

由于激光多普勒测量方法具有动态响应快、线性度好、测量范围大、精度高及非接触测量等许多独特的优点, 人们已将它成功地用于流体流速、固体运动速度和振动等方面的测量。近年来随着工程计量的需要, 人们又开发研究远距离处位移测量, 如在高温、放射性、强腐蚀等一些特殊环境中的位移测量, 大机械的动态变形场(如大型发电机或各种大型机械主轴在运转过程中的变形)、桥梁承载下的变形场检测, 以及对一些表面粗糙、形状复杂的物体轮廓或位移进行测量等等。但是, 用激光多普勒方法进行远距离测量, 物体的散射光信号很微弱, 有时还出现信号丢失或不连续。因此, 解决测量问题的关键是提高激光多普勒信号的强度、信噪比和信号质量。对此, 人们做了大量工作, 相继有一些报道^[1,2]。但是这些研究都只适用于普通纸张或表面较光洁的金属样品等一类运动物体, 并且可测距离也不大(小于 10 m), 而对于粗糙面位移则可测距离却小于 1 m。为此, 作者进一步研究了激光多普勒方法、锁相放大和数字滤波等技术, 对文献[2]系统(光路, 电路)作了一些改进, 特别是设计出一种能同时获得最高信噪比和精度的差分光路, 以及能重构因散射面纹理结构而丢失的信号的同态滤波系统, 因而本系统能圆满地实现 10 m 处粗糙面(如粗砂纸等类物体)的面内位移测量, 对普通纸张则可测 50 m 处的横向

位移。

2 测量原理

用于固体面内位移测量的差分式激光多普勒光路原理如图 1 所示。

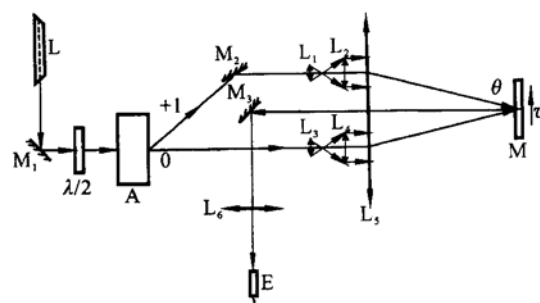


Fig. 1 Optical measuring system

由 He-Ne 激光器 L 发出的频率为 f_0 的激光束由 M_1 镜反射并经 $1/2$ 波片后以布拉格角入射到声光调制器 A (其调制频率 f_c 取 40 MHz 以提高抑制噪声和抗干扰能力) 上, 形成频率为 f_0 的 0 级和频率为 $(f_0 + 40\text{MHz})$ 的 +1 级衍射光, 它们分别经 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 准直, 并经大口径透镜 L_5 以 θ 角会聚于运动目标 M 上产生多普勒信号差频 (Δf), 其散射光(频率为 $f_c + \Delta f$) 又经 L_5 作用, 并由 M_3 镜、 L_6 会聚于光电接收器 E 上, 输出同频率的光电信号。为了得到与位移有关的多普勒差频信号 (Δf), 在 E 后面设置了锁相放大器^[3], 其原理方框图如图 2 所示。频率为 $(f_c + \Delta f)$ 的输出信号 V_1 与频率为 $f_R = f_c$ 的参考信号 V_2 一起送入锁相放大器, 并输出差频信号 Δf 。

事实上, 若两输入信号分别写成

$$V_1 = V_{10} \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t + \phi],$$

* 国家教委博士点基金资助课题。

E-mail: jlyy@eyou.com

收稿日期: 2001-12-10; 收到修改稿日期: 2002-03-11

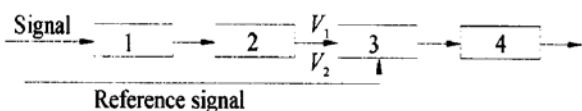


Fig. 2 Lock-in amplifier. 1: amplifier; 2: band-pass filter; 3: phase sensitive detector; 4: low-pass filter

$$V_2 = V_{20} \cos(2\pi f_c t), \quad (1)$$

则相敏检波器的输出为

$$\begin{aligned} V_3 &= V_1 V_2 = \\ &V_{10} V_{20} \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t + \phi] \cos(2\pi f_c t) = \\ &\frac{1}{2} V_{10} V_{20} \cos(2\pi \Delta f t + \phi) + \\ &\frac{1}{2} V_{10} V_{20} \cos[2\pi(2f_c + \Delta f)t + \phi]. \end{aligned} \quad (2)$$

这表示两输入信号经相敏检波器后变成频率分别为 Δf 和 $(2f_c + \Delta f)$ 的差频和频信号,若用后面的低通滤波器滤掉其中的高频成分则得到频率为 Δf 的位移测量信号。

根据激光多普勒效应(差动式),当被测散射体的移动速度为 v 时,其散射光的多普勒差频 Δf 为

$$\Delta f = 2 \frac{v}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (3)$$

若对这一差频信号进行脉冲累计计数,则可得运动物体的位移 x 。设累计的脉冲数为 N ,则

$$\begin{aligned} N &= \int_0^t \Delta f d\tau = \int_0^t \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) d\tau = \\ &\frac{2\sin(\theta/2)}{\lambda} \int_0^t v d\tau = \frac{2\sin(\theta/2)}{\lambda} x, \end{aligned} \quad (4)$$

因此,物体位移为

$$x = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} N. \quad (5)$$

由以上关系可以看出,在采用图 1 所示差动光路时,两束光的束腰交叠在散射面上,叠加区内的 θ 角或 $\frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}$ 保持为不变的常量,这时某一位移量就对应着一个确定的脉冲累计计数。特别是,对于一定值的位移,运动速度越大(小),所需时间就越多(少),尽管对应的多普勒频移随之变大(小),但由于累计时间的变短(长),总的脉冲累计计数仍为某一确定的值。这就是说位移测量是不受运动速度大小及其变化影响的。这一特点将给激光差动式多普勒位移测量带来极大的方便。

而脉冲计数通常用计算机来完成。为此,需要将锁相放大器输出的模拟信号转换成数字信号并进行数字信号处理。此外,为了提高位移测量精度,还

要将脉冲细分后再计数。此信号处理过程如图 3 所示,实际上这些过程都是由计算机完成的。

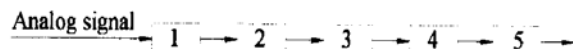


Fig. 3 Signal processing. 1: pretreatment filter; 2: sampling, AD conversion; 3: digital filter; 4: homomorphic filter; 5: subdivision, counting

3 系统的改进

为了得到最强的光信号及高的精度^[4],我们对文献[2]系统在光学、电学两方面做了一些改进。光学上,设计一种新的差动光路,即在两路光中分别用一准直系统(L_1 - L_2 、 L_3 - L_4)扩束(选择适当的结构参数如焦距比,可使光束直径在 40 mm 以上),然后在 L_2 、 L_4 的后焦面上增设一个大口径透镜(L_5),其焦距为 F 。这样,两路光束的束腰就聚焦在 L_5 的后焦点上或能交叠在远处的被测物面上。事实上,由高斯光束的聚焦、准直理论^[5],由于这时入射束腰(对 L_5)的物距 $l = 0$,束腰半径 $w_0 \geq 20$ mm,因此对应的像方束腰像距 l' 近似等于焦距 F ,像方束腰半径 w'_0 很小。为了充分发挥本光路的作用,在声光调制器 A(分光用)前加一半波片(旋转它能容易地使 A 输出的两束衍射光强相等),且将光路中的所有透镜镀增透膜,反射镜镀增反膜($R > 99.9\%$)。

在电学上,改用性能价格比较好的光电接收器——B-GJ3 型光电二极管光电混合集成接收器(其峰值响应波长 0.85~0.9 μm ,工作带宽 0.05~50 MHz,响应度高于 10 mV/ μW ,输出噪声谱密度低于 5×10^{-8} V/ $\sqrt{\text{Hz}}$)进行光电转换;用自行设计的适于 40 MHz、大 Q 值(大于 10^4)、高灵敏度的锁相放大器来拾取弱信号(此锁相放大器用两片 AD8001 组成,带通滤波选用大 Q 值的 9N322-40 MHz 石英晶体滤波器;整个锁相放大系统进行电、磁屏蔽);选用数字滤波和同态滤波系统来处理数字信号,特别是同态滤波系统可以重构因物体散射面纹理结构作用而丢失的信号。

4 同态滤波^[6,7]

由于同态滤波器是满足广义叠加原理的,即其输入、输出运算满足矢量相加和标乘的代数公式,所以可以把线性参量空间理论应用于同态系统或同态滤波器,使之能实现非线性滤波,即能用线性滤波的方法把乘积信号或卷积信号中的一个分离出来。

图 4(a) 所示为在散射面激光多普勒效应中因散射面纹理结构作用后而接收到的光电信号。这种带包络的断续信号可以看成是变化快的高频成分(为有用信号)与变化缓慢的包络部分相乘的信号。为进行数字滤波其解析式可用分离形式写成

$$x(n) = f(n) \sin(\omega n), \quad (6)$$

式中 $f(n)$ 作缓慢变化, 其变化频率 $0 \sim 200$ Hz。

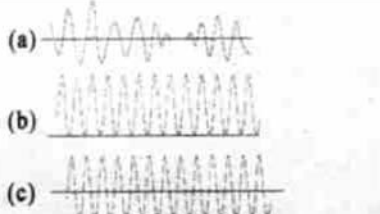


Fig. 4 Reconstructing of signal loss. (a) Signal loss; (b) Signal after passing; (c) Signal after passing bandpass filter homomorphic system

这种带包络的断续信号可以采用同态系统来处理, 其组成如图 5 所示。

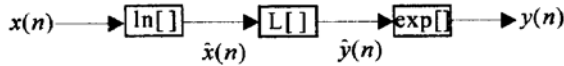


Fig. 5 Multiplicity homomorphic filter

其处理过程如下:

$$\begin{aligned} \hat{x}(n) &= \ln[x(n)] = \ln[|f(n)| |\sin(\omega n)|] = \\ &= \ln[|f(n)|] + \ln|\sin(\omega n)| = \\ &= \hat{x}_1(n) + \hat{x}_2(n), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{y}(n) &= L[\hat{x}_1(n) + \hat{x}_2(n)] = \\ &= L\{\ln[|f(n)|]\} + L[\ln|\sin(\omega n)|] = \\ &= \ln|\sin \omega|, \end{aligned}$$

$$y(n) = \exp[\hat{y}(n)] = |\sin \omega|,$$

$|\omega|$ 为 $2\pi/75 \sim 2\pi/15$, 频率为 200 Hz ~ 1 kHz。

实验所接收到的光电信号的频谱范围为 $0 \sim 7.5$ kHz(相应的采样频率取 2×7.5 kHz = 15 kHz); 激光多普勒信号频带从零到 1 kHz, 因此希望所设计的同态滤波器能滤掉低频成分 $f(n)$ 和高于 1 kHz 的高频噪声。为此, 其中的线性滤波 L 采用一个带通滤波器来实现, 其幅频特性如图 6 所示。

对应的解析式如下:

$$H[\exp(i\omega)] = \begin{cases} 0 & 0 \leq |\omega| < 2\pi/75, \\ \exp\left[-i \frac{N-1}{2} \omega\right] & 2\pi/75 \leq |\omega| \leq 2\pi/15, \\ 0 & 2\pi/15 < |\omega| \leq \pi. \end{cases} \quad (7)$$

通常我们讨论离散时间系统频率响应的性质都是在 $(0 \leq \omega \leq \pi)$ 区间进行的。在这里 ω 的上限 π 对

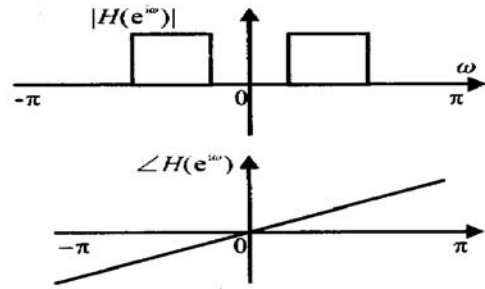


Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic of bandpass filter

应于系统的最高频率 7.5 kHz, 而 1 kHz 对应于 $\omega = 2\pi/15$, 200 Hz = $(1/5)$ kHz 对应于 $2\pi/75$; 式中的相位因子 $\exp\left[-i \frac{N-1}{2} \omega\right]$, 其作用是使脉冲序列进行适当的延迟以保证可实现性, N 是相应的脉冲响应序列长度。事实上, 还需在求出(7)式的傅里叶逆变换及其加汉明窗孔的数字滤波器的脉冲响应后, 滤波器设计的主要工作才算完成。

利用上述理论设计、编写的同态滤波器能滤掉光电信号中的缓慢变化的低频部分, 提取位移测量用的信号。如图 4(b) 所示信号就是用这种同态滤波器对图 4(a) 所示信号处理后的结果, 其中还含有直流成分, 用带通滤波器 L 再对它进行滤波就得图 4(c) 所示信号波形, 这时信号得到了倍频, 即相当于对信号进行了二细分。

5 位移测量及结论

用由图 1 所示光路、上述的锁相放大器和同态滤波器等组成的测量系统对 10 m 处粗砂纸和 50 m 处普通纸张的面内位移分别进行测量。实验得出多普勒信号是令人满意的, 并且能测出它们与测量显微镜比对的位移, 表 1、表 2 所示为测得的其中的两组实验结果(He-Ne 激光器输出功率为 15 mW)。

实验证明, 利用本测量系统能圆满地实现远距离处散射体的面内位移测量, 特别是所设计的差动光路能使差动的两束光的束腰交叠在散射面上, 实现最小交斑直径和不变的会聚角(在叠加区内), 因此能获得最强光信号、最高信噪比和测量精度; 所设计的同态滤波器在重构丢失的信号和倍频等方面都起到了积极的作用, 对位移测量精度的进一步提高作出了重要贡献。但是, 对于不同的距离需要设计不同的光学镜组($L_1 \sim L_6$), 相应的要求和成本也不一样。距离越远, 镜组设计要求和成本越高。此外, 随着距离的增加, 运动物体的散射光多普勒信号也

Table 1. Displacement measurement result of sand paper (No. 3) in distance of 10 m (compared by the micrometer of measuring microscope, adjustable range 0~ 55 mm)

Measurement / mm	Comparison / mm	Error / mm
5.205	5.230	- 0.025
10.240	10.200	0.040
15.200	15.130	0.070
20.327	20.237	0.090
25.472	25.350	0.122
30.600	30.450	0.150
35.296	35.116	0.180
40.370	40.275	0.195
45.440	45.225	0.215
50.378	50.150	0.228

Table 2. Displacement measurement result of common paper in distance of 50 m (compared by the micrometer of measuring microscope, adjustable range 0~ 55 mm)

Measurement / mm	Comparison / mm	Error / mm
5.150	5.210	- 0.060
10.128	10.180	- 0.052
15.050	15.150	- 0.100
20.139	20.180	- 0.041
25.184	25.060	0.124
30.070	29.816	0.254
35.236	34.826	0.410
40.609	40.005	0.604
45.760	45.060	0.700
50.630	50.030	0.600

越来越弱,相应的测量误差将随之增大。如果采用

更加灵敏、信噪比更高的光电接收器以及等效 Q 值更大、检测灵敏度更高的锁相放大器和像差校正更好的、口径更大的透镜 (L_5 、 L_6), 那么可测量距离能达到 100 m。不过, 距离更远时, 空气气流的扰动及震动将会突出并成为新的难点。若解决不好, 稳定性就得不到保证, 甚至使测量无法进行。

参 考 文 献

- 1 Hong Xin, He Shunzhong, Jian Chengzhi *et al.*. Remote displacement measurement of solid scattering surface utilizing laser Doppler effect. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(1): 118~ 121
- 2 Zhang Xiaoyuan, Hong Xin, He Shunzhong *et al.*. Study on measurement technique of displacement of scattering surface utilizing laser Doppler effect. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(8): 751~ 754 (in Chinese)
- 3 Wan Xiping. *Integrated Phase Lock Loop* (集成锁相环路). Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House, 1995. 48~ 51 (in Chinese)
- 4 Drain L E. *The Laser Doppler Technique* (激光多普勒技术). Transl. Wang Shikang, Shen Xiong, Zhou Zuoyuan. Beijing: Tsinghua University Press, 1980. 105~ 107 (in Chinese)
- 5 Zhou Bingkun, Gao Yizhi. *Principles of Laser* (激光原理). Beijing: National Defence Industry Press, 1980. 354~ 361 (in Chinese)
- 6 Guan Zhaozhi. *Analysis and Processing of Signals* (信号分析与处理). Beijing: Science Press, 1986. 230~ 236 (in Chinese)
- 7 Yao Tianren. *Contemporary Digital Signal Processing* (现代数字信号处理). Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1999. 166~ 169 (in Chinese)

Study on Signals of In-Plane Displacement Measurement Utilizing Laser Doppler Effect

He Shunzhong Liu Yanyu Jiang Chengzhi Chen Lincai Yao Xin

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 10 December 2001; revised 11 March 2002)

Abstract: When utilizing laser Doppler effect to measure in-plane displacement of an object at long distance, the intensity of Doppler signals of scattering light, SNR and quality of signals are very important parameters, and they affect the distance and accuracy of displacement measurement directly. The Doppler differential method, lock-in amplifier and homomorphic filter are studied. A differential optical measuring system with the best effect, a lock-in amplifier with high sensibility and high Q and a homomorphic system that can re-construct the lost signals are designed. So the transverse displacement measurement of object at distance of 50m is accomplished with the maximal relative error of 1.5%.

Key words: information processing technique; Doppler effect; in-plane displacement; lock-in amplifier