

激光多普勒效应地震波实时测量技术的研究*

黄福祥¹ 杜振辉^{1*} 李朝阳² 吕丽娜¹ 蒋诚志¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

(2. 天津大学无线电厂 天津 300072)

摘要 传统的磁电式地震检波器易于受到电磁干扰、存在非线性;提出一种应用激光多普勒技术的地震波检测方法,采用优化设计的差动光路结构方案、信号处理单元的适宜带宽。通过 E/V 转换可以实时地得到被测速度、位移、加速度和频率。实现线性测量的频率范围 1.0~1000Hz,动态范围 100dB。

关键词 地震检波器 多普勒效应 地震勘探 振动测量

地震波勘探是检测、记录人工地震在选定时间/地点反射和折射的能量,并对记录的数据处理、反演,推断地下地质层的边界、形状以及地藏物质的属性;是一种最有效的近代地球物理勘探方法,高分辨率已经成为其主要发展方向。近年来,地震信号记录仪器、信号处理方法和技术手段都有长足的进步;而所使用的地震传感器仍然具有 50 多年历史的“永磁-动圈”式电磁检波器,这种检波器的灵敏度低、存在非线性、易于受到外界干扰。地震检波器的性能已成为制约高分辨率地震数据采集发展的瓶颈¹,而新型地震检波器的开发研究受到国内外的关注,如美国 I/O 公司的 Vector 系列 MEMS 数字加速度计²、AD 公司的 ADXL 系列 MEMS 加速度计,天津大学研制的光纤地震检波器³。

激光多普勒测量技术以它精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大、非接触测量等特点在各种运动测量中得到很大的发展^{4,5}。本文研究基于激光多普勒效应的地震波测量、采集技术。

1 测量原理

1.1 多普勒频移

激光多普勒测量的光学结构有多种类型,在外差式双光束差动结构中,接收的散射光为两束光经过多普勒频移的光相干涉。如图 1 所示,两平行激光光束 和光束 ,其频率分别为 f_0 、 $f_0 + f_c$,经透镜会聚在被测物表面上,被测物以速度 V 运动。光束 和光束 与速度 V 的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 ,散射光与速度 V 的夹角为 θ_3 ,光束 和光束 的散射光的多普勒频移分别为

$$f_1 = \frac{f_0 V}{c} (\cos \theta_3 - \cos \theta_1)$$

$$f_2 = \frac{(f_0 + f_c) V}{c} (\cos \theta_3 - \cos \theta_2) \quad (1)$$

光电接收器得到的交流电流为:

$$i(t) = k E_1 E_2 \cos[2\pi f t + \phi] \quad (2)$$

$$\text{其中: } f = f_1 - f_2 = f_c + \frac{2V}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

$$\theta = \theta_2 - \theta_1$$

在多普勒频移中包含了被测速度的信息。虽然散射光的频移是接收方向(θ_3)的函数,但是散射光的频差 f 与接收方向(θ_3)无关。

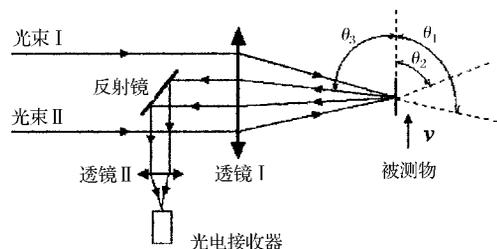


图1 差动激光多普勒测量原理

1.2 振动测量信号

对于正弦振动信号,其速度为:

$$(\dot{x}) = A_0 \omega_x \cos(\omega_x t + \phi_x) \quad (4)$$

式中 ω_x 为振动的角频率, A_0 为振幅, ϕ_x 为位移的初相位。速度的初相位 $\phi_x = \phi_x + \pi/2$ 。

将(3)、(4)两式代入到(2)式,忽略直流分量,得到测量振动的差拍信号为:

$$i(t) = 2 \sqrt{I_{+1} I_{-1}} \cos[\omega_c t + 2\pi d A_0 \omega_x \cos(\omega_x t + \phi_x) t + \phi]$$

$$\text{其中: } d = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}, \omega_c = 2\pi f_c$$

*国家自然科学基金(No. 40274046)资助项目

* *联系人:杜振辉 天津大学精密仪器学院 # 235. 电话:022-27401704; E-mail: duzhenhui@twtmail.tju.cn

令： $m_p = 2 \quad dA_0, S_0 = 2 \sqrt{I_{+1} I_{-1}}$ 得到：

$$i(t) = S_0 \cos[\omega_c t + m_p \omega_x \cos(\omega_x t + \phi_x) t + \dots] \quad (5)$$

由(5)式知振动的差拍波为相位调制信号。对(5)式作 Fourier 级数展开,得到：

$$\begin{aligned} i(t) &= S_0 [\cos(m_p \omega_x \cos(\omega_x t + \phi_x) t) \cos \omega_c t - \\ &\quad \sin(m_p \omega_x \cos(\omega_x t + \phi_x) t) \sin \omega_c t] \\ &= S_0 [J_0(m_p) + \\ &\quad + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m_p) \cos(2n\omega_x t) \cos \omega_c t - \\ &\quad + S_0 [2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(m_p) \sin(2n-1)\omega_x t \sin \omega_c t \\ &\quad + S_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m_p) \cos(\omega_c + m\omega_x) t \end{aligned}$$

注:其中 $J_n(m_p)$ 为 n 阶贝塞尔函数。

理论上差拍波中会包含无穷多个频谱项,但是,随 n 的增加,贝塞尔函数 $J_n(m_p)$ 的最大值逐渐下降,实际上的频谱分布仍然是集中的。对于多普勒测量系统,考虑各种测量情况,其频带宽度宜按照宽带调相原则设计：

$$W_{FM} = 2 m_p \omega_x$$

2 振动测量系统

图 2 是地震波测量装置的光路结构、信号处理及数据采集系统的原理图。该系统的光路部分由激光器、声光晶体、透镜组、光电接收器等组成。包含被测速度信息的多普勒信号经光电转换送入信号处理单元,在信号处理单元中进行放大、滤波、锁相环频率跟踪、F/V 转换等处理。最后计算机作数据的采集、处理。

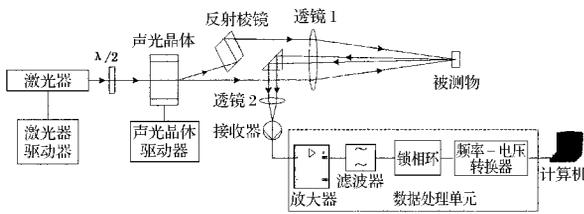


图 2 激光多普勒 MEMS 构件运动测量系统原理图

2.1 测量光路

由 He - Ne 激光器发出频率为 f_0 的激光束,经 $\lambda/2$ 波片后以布拉格角入射到声光调制器(调制频率 $f_c = 40\text{MHz}$)发生衍射,形成频率为 f_0 的 0 级光束和频率为 $(f_0 + 40\text{MHz})$ 的 +1 级光束。+1 级光经棱镜调整方向与 0 级光一起被透镜组(lens1)聚焦到被测物体,其后向散射光由透镜组(lens1)收集,经反射镜、由透镜组(lens2)会聚进入光电接收器将差拍光信号转换为电流信号。

2.2 信号处理电路

激光多普勒测量系统中,尤其是后向散射光光路的信号质量差、信噪比低,为保证测量精度、减小频率测量误差,可以采用锁相环频率跟踪器⁵。利用相位误差实现环路控制,没有残余频差,具有良好的频率跟踪特性;其环路滤波器具有窄带滤波特性,能够将混进输入信号小的噪声和杂散干扰滤除。

锁相环输出的调制信号,通过频率/电压变换器(F/V)得到多普勒频率波形,即被测物体的速度波形。由速度波作微分可以得到加速度波形、或积分得到位移波形,速度波形变化的周期相应于振动的周期。

3 实验和误差分析

进行实际测量实验装置(见图 2)。激光器采用 He - Ne 激光管及配套稳频电源,功率 1.2mW;信号处理电路为本课题组自己研制。振动源采用 B&K 公司生产的振动台设备,激振器型号 4089,功放型号 2706,信号发生器型号 1027;铝片作为被测目标(散射体)固定在激振器上,数据采集、处理是基于 NI 公司的 Labview,采集卡采用 DAQ-PCI6023E。

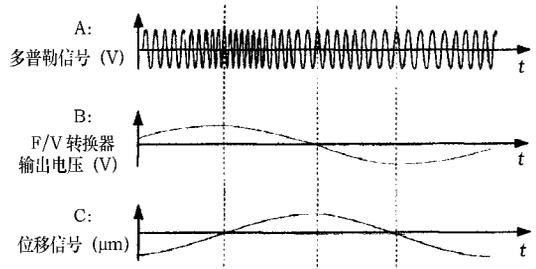


图 3 测量的信号波形

图 3 为实验得到的差拍波形,图 3A 为 PLL 输出的调相多普勒跟踪信号,图 3B 为 F/V 转换器输出的电压,即被测速度波形,图 3C 为对速度信号积分得到的被测位移波形。图 4 所示曲线为信号发生器的频率稳定在 20.0Hz,调节其输出信号的电压,由图 2 所示系统测量并记录的被测目标的振幅值。由曲线可以看出,当振幅测量值大于 20nm 时随信号源电压具有很好的线性特性;而 20nm 以下的线性特性变差,同时测量结果的可重复性也变坏。图 4 所反映的系统动态范围大于 100dB。

影响系统测量精度的因素主要有:光束聚焦的光点大小、外界干扰和环境条件的影响。光束聚焦的光斑直径过大会恶化多普勒加宽,而增大测量误差。使测量光的光斑尽可能小,一般需要小于 50μm。但太小的光斑直径会导致短的束腰长度,减

小测量范围,并使系统的调试难度加大。由于高斯光束的腰斑与束腰长度存在着相反的综合调整,需要对这二者作折中,并通过光路的优化设计减小测量误差。外界的强电磁干扰是影响测量精度的另一个主要原因,尤其是声光晶体驱动器发射的40MHz及其谐波信号的泄漏,由于它与信号的载波频率相同,因此需要采取高级的信号处理算法消除。外界影响尤其是振动会使光路结构参数发生变化,是引起误差的主要因素。

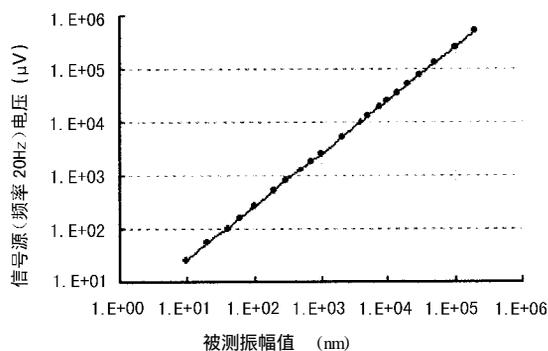


图4 系统测量振动的线性特性

4 结束语

理论分析和实验结果表明,采用外差法激光多普勒测量微小振动,可以提高位移测量的分辨率;合理的信号处理带宽设计,可以有效的提高测量系统的动态范围。可以应用于半导体工业、汽车、机床、建筑物、地震波等的动力学特性测量分析中。

参考文献

- 1 李庆忠(院士). 地震高分辨率勘探中的误区与对策[J], 石油地球物理勘探, 1997, 32(6): 751 ~ 783
- 2 Goldberg, Howard; Gannon Jeff, Marsh James, An extremely low - noise micromachined accelerometer with custom ASIC circuitry[J], Sensors (Peterborough, NH), 2001, 18(5): 52 ~ 56
- 3 丁桂兰, 刘振富, 陈才和等. 三分量全光纤加速度地震检波器的设计[J], 光电子 激光, 2002, 13(1): 50 ~ 52
- 4 Gulio D Emilia. Evaluation of measurement characteristics of a laser Doppler Vibrometer with fiber optic components. Proc. SPIE, 1994, 2358: 240 ~ 247
- 5 杜振辉, 贺顺忠, 蒋诚志等. 激光多普勒效应回转体表面轮廓测量系统[J], 光电子 激光, 2003, 14(9): 977 ~ 980

Study on measurement technique of seismic wave in real - time utilizing laser doppler effect

Huang Fuxiang¹ Du Zhenhui¹ Li Chaoyang² Lv Lina¹ Jiang Chengzhi¹

(1. State Key Lab of Precision measuring Technology and Instruments, Tianjin Uni, Tianjin, 300072, China)

(2. Radio Factory, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract The magneto - electric geophone has a few troubles such as electromagnetic interference, permanent magnet's non - linearity. A new method of seismic acquisition using laser Doppler effect with an optimized differential optical configuration is proposed. The frequency bandwidth is properly determined by analyzing the frequency of the Doppler signal. The velocity, displacement, acceleration and frequency to be measured can be acquired in real - time by F/V converting the FM Doppler signal. A 100dB dynamic range and the linear frequency range of 1.0 to 1000Hz are realized.

Key words Geophone Doppler effect Seismic prospecting Vibration measurement

(上接第9页)

The application progress of X - ray diffraction analysis technique in new drug and pharmacy research

Lv Yang Wu Yunshan Zheng Qitai

(Institute of Materia Medica, Chinese Academy of Medical Sciences and

Peking Union Medical College Beijing 100050 China)

Abstract X - ray diffraction analytical technique appeared in China from the end of 1950's. Now it is widely used in physics, chemistry, geology, biology, material science, pharmacy etc. This analytical technique has been applied in medicine detection from 1970 in USA. But in China, it is not listed in the partly items of new drug and China Pharmacopeia until the end of the 20th century. This paper can tell you the newest progress, application areas and major function of X - Ray diffraction analytical technique in pharmacy research. It is helpful to the researcher of pharmacy.

Key words X - Ray diffraction analysis Pharmacy research Application progress