

光纤非接触加速度计

张仲先 徐向东

(浙江大学光电科仪系, 杭州 310027)

李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都 610003)

摘 要 介绍一种新型光纤非接触加速度计。入射激光经长短不同的两光纤, 在两个不同的时间对物体同一点的速度取样, 由物体返回的光束经偏振光路实现长短光路互易成近于等光程干涉, 利用外差技术测量多普勒频差得到物体的加速度值。

关键词 加速度计, 光纤干涉仪, 时间延迟干涉仪。

1 引 言

现有多种加速度计被用于测量冲击和振动的加速度, 其中很多要接触物体才能工作, 这常常干扰了物体的运动^[1, 2]。一些不接触的光学方法或是测量物体的位移, 或是测得物体的速度, 通过信号处理后给出加速度^[3, 4]。这些方法较难应用于位移很小而加速度很大的场合。本文介绍的光纤非接触加速度计能克服这些缺点, 它特别适合于冲击、碰撞和爆炸的加速度测量。

2 原 理

光纤非接触加速度计的原理示于图1。频率为 f_0 的偏振光束被驱动频率为 f_s 的声光调制器 AOM 所调制。通过 AOM 的零级光被耦合进光纤端点 b, 经 $\lambda/2$ 波片并通过耦合器 C_1 、偏振分光镜 PBS 和 $\lambda/4$ 波片射向物体 T。从 T 反射后, 经 $\lambda/4$ 波片, PBS 被反射至光纤端点 e, 经过耦合器 C_3 , 第二个 $\lambda/2$ 波片和耦合器 C_2 , 到达光纤出射端 g。通过 AOM 的频率为 $f_0 + f_s$ 的一级衍射光被耦合进另一光纤端点 h, 经耦合器 C_3 后被 PBS 反射至 $\lambda/4$ 波片并射向物体 T。从 T 反射后, 经 $\lambda/4$ 波片、PBS 进入光纤端点 d。经耦合器 C_1 和 C_2 也到达光纤出射端 g。当物体静止时两束光的光程是相等的, 这样可降低对光源相干性的要求。

激光通过两支不同长度的光纤到达物体其时间差为 τ :

$$\tau = n(L_{me} - L_{kd})/c, \quad (1)$$

式中 L_{me} 为光纤端点 m 至 e 的物理长度, L_{kd} 亦同。 n 为光纤芯的折射率, c 为真空光速。若物体

* 中国工程物理院院外基金资助。

收稿日期: 1994年3月31日; 收到修改稿日期: 1994年5月11日

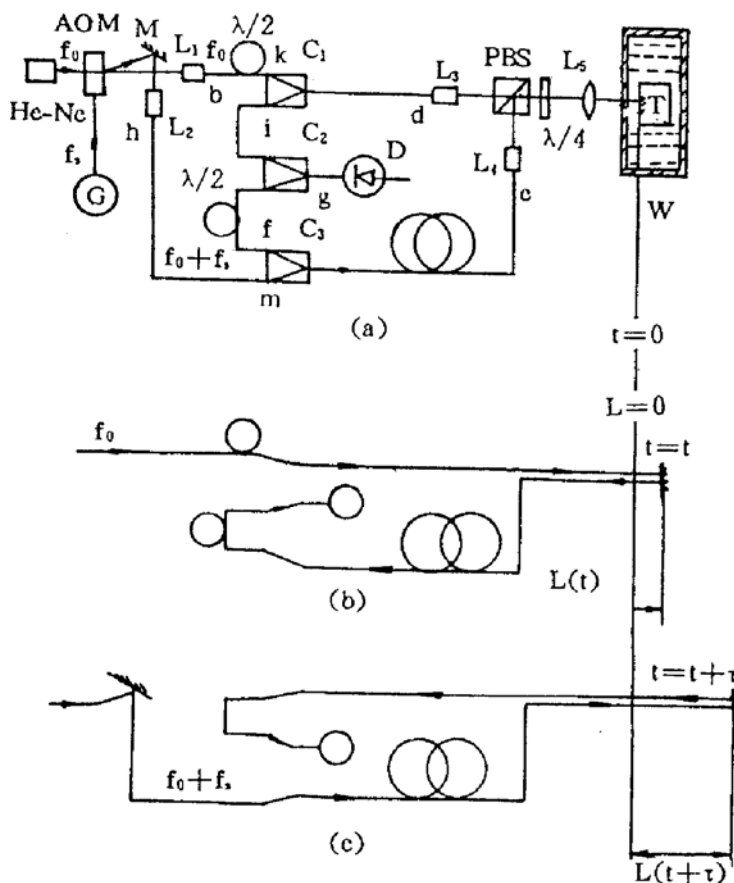


Fig. 1 (a) Schematic of the fiber optic non-contact accelerometer

He-Ne; He-Ne laser, AOM; acousto-optic modulator, $L_1 \sim L_5$; lenses, C_1, C_2, C_3 ; optical fiber coupler, PBS; polarization beam splitter, M; mirror, $\lambda/4$; quarter wave plate, T; target, D; photodetector, W; water tank, G; acoustic frequency generator, b, d, e, f, g, h, i, k, m; fiber ends, $\lambda/2$; half wave plate

(b) Optical path of the frequency unshifted beam

(c) Optical path of the frequency shifted beam

式中 m_a 为相位调制系数, $m_a = (8\pi/\lambda)n' A \sin \pi f_a \tau$. 由贝塞尔函数的递推公式:

$$m_a = \frac{2p J_p(m_a)}{J_{p-1}(m_a) + J_{p+1}(m_a)}, \quad (8)$$

振动物体的振幅 A 和加速度 a 分别为:

$$A = m_a \lambda / n' 8\pi \sin \pi f_a \tau, \quad a = -4\pi^2 f_a^2 A \cos 2\pi f_a t.$$

3 实验结果

用 10 mW He-Ne 激光器作光源, 声光调制器调制频率为 50 MHz, 单模光纤长 1 km (折射率 $n = 1.456$). 光经此光纤时间延迟 $\tau = 4.85 \times 10^{-6}$ s). 测试对象是浸没在水中的水听器, 振动频率 860 KHz. 光电探测器输出电流信号的频谱由 HP8590 A 频谱分析仪显示. 结果示于图 2. 各频谱功率分别为 $R(i_0 J_1)^2 / 2 = -56.05$ dB_m, $R(i_0 J_2)^2 / 2 = -46.49$ dB_m 和 $R(i_0 J_3)^2 / 2 = -44.51$ dB_m, $R = 50 \Omega$, 故 $i_0 J_1 = 9.97 \mu A$, $i_0 J_2 = 29.96 \mu A$ 和 $i_0 J_3 = 37.63 \mu A$ (因 $i_0 J_0$ 谱受声

以速度 $V(t)$ 运动, 瞬时光路长度 $L(t)$ 和相位 $\phi(t)$ 分别为:

$$L(t) = \int_0^t V(t) dt, \quad (2)$$

$$\phi(t) = (2\pi/\lambda) 2n' L(t). \quad (3)$$

式中 n' 是浸没物体的介质折射率. 光电探测器输出的电流 $i(t)$ 为:

$$i(t) = i_0 \cos [2\pi f_s t + \phi(t + \tau) - \phi(t)]. \quad (4)$$

瞬时频率 $F(t)$ 为:

$$F(t) = f_s - (1/2\pi) (d/dt) [\phi(t + \tau) - \phi(t)] \\ = f_s + (2/\lambda) \tau a(t + \tau/2). \quad (5)$$

物体的加速度 a 可从频率相对于 f_s 的偏移来测量:

$$a(t + \tau/2) = (\lambda/2) (1/\tau) [F(t) - f_s]. \quad (6)$$

由 (6) 式可知, 改变光纤长度很容易获得所需 τ 值, 以满足不同速度测量范围的要求.

当物体作正弦振动 $L(t) = A \cos 2\pi f_a t$,

(4) 式变为:

$$i(t) = i_0 \cos [2\pi f_s t - (8\pi/\lambda) n' A \sin \pi f_a \tau \\ \times \sin 2\pi f_a (t + \tau/2)] \\ = i_0 \{ J_0(m_a) \cos 2\pi f_s t \\ + J_1(m_a) [\cos 2\pi (f_s + f_a) t \\ - \cos 2\pi (f_s - f_a) t] \\ + J_2(m_a) [\cos 2\pi (f_s + 2f_a) t \\ - \cos 2\pi (f_s - 2f_a) t + \dots] \} \quad (7)$$

光调制器驱动频率的干扰而没有应用)。将上述数值代入(8)式得 $m_a = 2.518$, 进而求得振动振幅和加速度值 $A = 94.2 \text{ nm}$ 和 $a = 2.75 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 。

为扞验测量结果的准确性, 应用图 3 所示的速度干涉仪。激光经声光调制器调制, 未频移光入射至目标, 被反射后经分光棱镜反射到达光电探测器 D。频移光束被反射镜 M_1 和 M_2 反射也到达 D。当水听器未振动时, 使两光路等长。输出光电信号时变分量 $i(t)$ 为

$$i(t) = i_0 \cos [2\pi f_s t + (4\pi/\lambda) n' A \cos 2\pi f_c t], \tag{9}$$

此调相波的调制系数

$$m_v = \frac{4\pi}{\lambda} n' A \tag{10}$$

图 4 示出与上述条件相同时水听器的实验结果, 测得加速度为 $a = 2.72 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 。两种方法测得的数值差为 1%。

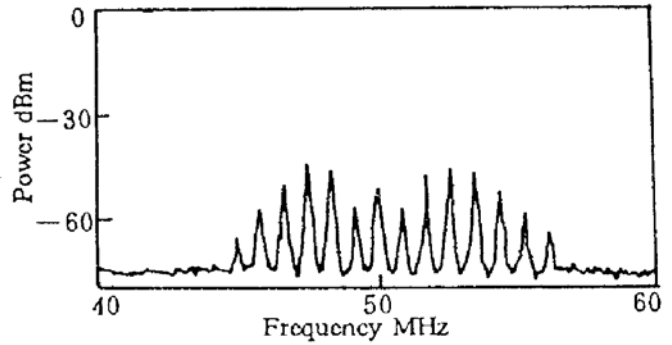


Fig. 2 Power spectrum of the hydrophone vibration

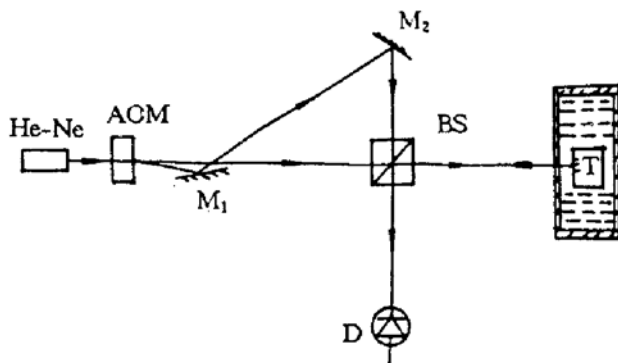


Fig. 3 Schematic of the heterodyne velocimeter

BS: beam splitter

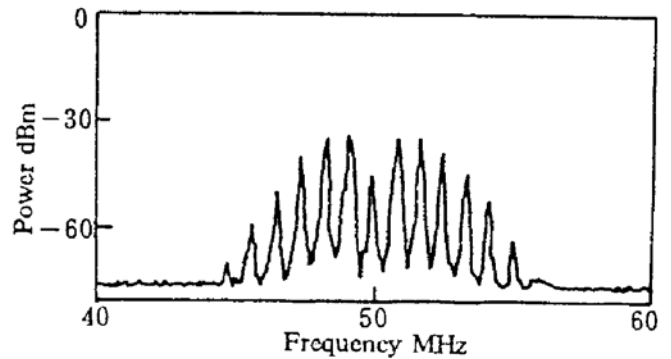


Fig. 4 Spectrum of the hydrophone vibration measured by velocimeter

结 论 应用正弦振动体作原理性试验是为了易于实施。用不同方法验证了光纤非接触加速度计的可行性。如用鉴频器等直接测出瞬时频率的变化而不用频谱分析仪则可直接得到加速度变化曲线。加速度上限不受光纤系统限制。利用等光程干涉, 对光源相干性要求降低, 有利于应用大功率半导体激光器与光纤直接耦合工作。

作者与加拿大安大略激光与光学研究中心合作, 在多伦多大学电机系教授饭冢启吾处作了部份工作, 在此向饭冢启吾教授致谢。

参 考 文 献

[1] Benham, R. A., Duggins, B.D., Observations of the shock response of specific piezo resistive accelerometer. *Proc. 38th Annual Meeting of the Institute of Environmental Science, Nashville, TN, USA, 1992: 68~78*

[2] Kourepenis, A., Petrovich, A., Weinberg, M., Low cost quartz resonant accelerometer for aircraft inertial navigation. *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1991: 551~553*

- [3] Harris, C. M. , Crede, C. E. , (Eds.) *Shock and Vibration Handbook*, 3rd ed. McGraw Hill, New York, 1988
- [4] Amick, H. , Bui, S. K. , A review of several methods for processing vibration data. *Proc. SPIE*, 1992, 1619 : 253~264

A Novel Optical Fiber Non-Contact Accelerometer

Zhang Zhongxian Xu Xiangdong

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Li Zeren

(Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu 610003)

(Received 31 March 1994; revised 11 May 1994)

Abstract A novel non-contact fiber optic accelerometer is presented. The velocity of a moving target is sampled at different times by two beams originating from the same laser but with different feed path lengths. The acceleration of the target is measured by heterodyning the two Doppler shifted return beams. By directing each return beam to the detector via the feed path taken by the other beam, equal path lengths are ensured relaxing the coherency requirements of the light source.

Key words accelecometer, optical fiber interferometer, time delay interferometer.