

文章编号: 1001-3806(2006)02-0183-03

激光多普勒双光束横向测速技术研究

王忠凯¹, 毕建民², 周 昕¹, 陈建国^{1*}, 陈 涌³, 杨泽后³, 孙 鹏³

(1. 四川大学 光电技术系, 成都 610065; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089; 3. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了实现基于 CW CO₂ 激光的运动目标横向速度测量, 使用双光束方式在室内进行了实验, 得到了较清晰的多普勒频移信号, 并对信号数据进行了滤波处理, 以提高信噪比。计算出了运动目标速度并与实际速度进行了比较。结果表明, 测得速度值与实际值相当接近。

关键词: 激光技术; 多普勒测速; 双光束; 测量区; 快速傅里叶变换

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Investigation on dual-beam Doppler speedometer based on CO₂ lasers

WANG Zhong-kai¹, BI Jian-min², ZHOU Xin¹, CHEN Jian-guo¹, CHEN Yong³, YANG Ze-hou³, SUN Peng³

(1. Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. China Academy of Weapons, Beijing 100089, China; 3. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract An experiment set-up is constructed to measure the transverse velocity of a moving target by using dual beam mode of CW CO₂ laser in the laboratory. The experiment is conducted in the laboratory using dual-beam mode and clear Doppler frequency signals are recorded, and signal data filtering is performed leading to an enhanced SNR. The calculated velocity of the moving target is compared with the actual velocity. The result shows that the measured velocity corresponds with the actual velocity very well.

Key words laser technique; Doppler speedometer; dual-beam; measurement volume; fast Fourier transform (FFT)

引 言

自从 1964 年第 1 次采用激光对流体速度进行测量^[1]以来, 激光多普勒测速技术就以非接触性、高空间分辨率和适用于恶劣环境测量等突出特点得到了巨大的发展和广阔的应用^[2,3]。激光多普勒测速中的双光束方式可以准确地实现横向速度的测量, 在军事和工程上有着重要意义^[4]。

与其它方式相比, 双光束方式测速具有突出的优点。参考光方式和直接探测测速方式, 只能实现纵向速度测量, 其中后者主要适用于较高速度的测量, 而且速度的分辨率较低^[1]。同时, 参考光方式测速时, 得到的多普勒信号同接收方向有关, 探测器的孔径大小也会影响探测精度, 为了得到较好的多普勒信号, 探测器的孔径要做得比较小; 而双光束方式中, 信号与接收方向无关, 可以在任意方向接收, 并且测量精度较高, 所以在固体速度的测量中, 一般使用双光束系统^[5]。

与使用其它波段的激光相比, 使用 CO₂ 激光测速具有如下的优点: CO₂ 激光对大气的穿透能力强, 是大气传输的窗口, 便于实现远距离的测量; 使用 CO₂ 激光进行测量时获得的回波信号不受可见光波段的环境光影响, 便于微弱信号的收集; CO₂ 激光属远红外波段, 易于实现相干探测, 且处于人眼安全范围; CO₂ 激光器的能量转换效率高达 10%^[6]。因此, 对于相干激光雷达而言, CO₂ 激光是良好的光源。另外, LI 等^[7]曾经指出, 差动 (即双光束) 方式的一大缺点是激光束的交叉域 (即测量区) 太小, 被测物体的表面不易于固定于此区域。这容易造成信号的中断或失真。不过如果使用 CO₂ 激光, 由于其波长较长, 计算表明, 在其它参数接近的情况下, CO₂ 激光束形成的测量区要比使用可见光波段的激光形成的大 10 倍以上, 较好地避免了可能产生的信号中断或失真的情况。同时, CO₂ 激光的双光束方式测速国内尚未见报道, 对其进行研究和实验是有一定的价值和意义的。

作者对 CO₂ 激光双光束方式横向测速进行了实验研究和探索, 得到了较明确的实验结果, 并利用平滑滤波的方法抑制了噪音, 提高了信号的信噪比, 较准确地测量了物体的速度。

作者简介: 王忠凯 (1979-), 男, 硕士研究生, 目前主要从事激光技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: optics_hk@163.com

收稿日期: 2005-09-12 收到修改稿日期: 2005-09-29

1 基本原理

双光束方式测速的原理如图 1 所示,同一激光源

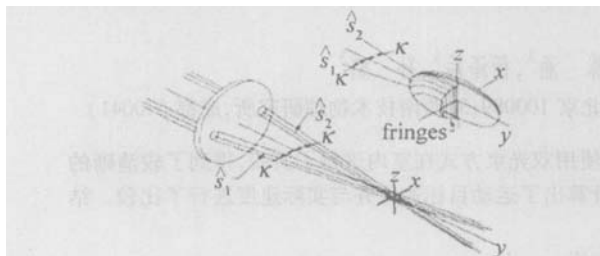


Fig 1 Schematic of dual-beam laser Doppler speedometer

分出的两束平行相干光通过透镜会聚后,在焦点位置形成一测量区。由于干涉效应,测量区中形成了沿图中 x 方向(横向)分布的等间距叠栅条纹,条纹面与光束所在平面垂直^[8]。

设激光波长为 λ ,光束交角为 2κ ,根据干涉理论,条纹间距 H 为^[8]:

$$H = \frac{\lambda}{2s \sin \kappa} \tag{1}$$

由于测量区内干涉条纹的存在,光强沿 x 方向呈现强弱相间分布,当微粒以一定的速度(横向分量大小为 v_1)通过测量区时,其散射光光强呈周期起伏,起伏的频率即多普勒频移 f_D 为^[8]:

$$f_D = \frac{v_1}{H} = \frac{2s \sin \kappa}{\lambda} v_1 \tag{2}$$

因此,通过对散射信号的多普勒频率 f_D 进行测量,就可以根据上式计算出聚焦点处目标的横向移动速度。

2 实验装置

实验光路如图 2 所示。 CO_2 激光器输出功率约

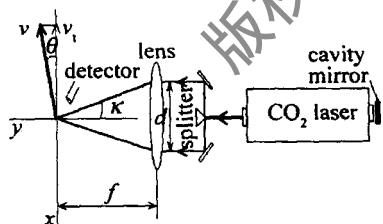


Fig 2 Schematic diagram of the experimental setup

2.5W,通过分光镜及两个转折镜将激光束分为等强度的两束平行光,两束光间距 $d = 63\text{mm}$ 。光束通过焦距 $f = 270\text{mm}$ 的透镜会聚后,在空间形成相干测量区,光束交角 $2\kappa = 2 \arctan(d/2f) \approx 13.33^\circ$ 。光束聚焦在转速可调的微型风扇的叶片上,焦点处风扇转速大小为 v 方向与 x 轴的夹角 $\theta \approx 26^\circ$,转速的 x 分量(横向)大小为 v_x ,根据(2)式可得:

$$v_x = \frac{N f_D}{2s \sin \kappa \cos \theta} \tag{3}$$

实验中,通过调节加在风扇上的直流电压 V 来控制风

扇的转速。叶片表面经处理后可近似视为朗伯反射面。后向散射光由液氮冷却的 $HgCdTe$ 探测器收集,经信号放大器放大,送入 GAGE CS14200 高速采集卡进行实时采集并进行快速傅里叶变换(FFT),采集速度为 1MHz 。

设分光前光束束腰直径为 D_e ,由于 CO_2 激光器波导的宽和高均为 2.5mm ,可近似取 $D_e = 2.5\text{mm}$,则测量区的长 l_m 和宽 d_m 分别为^[8]:

$$l_m = \frac{4Nf}{\pi D_e \sin \kappa} = 12.6\text{mm} \tag{4}$$

和

$$d_m = \frac{4Nf}{\pi D_e \cos \kappa} = 1.47\text{mm} \tag{5}$$

因此,测量区中所包含的条纹数 $N = \frac{d_m}{H} = \frac{2d_m \sin \kappa}{\lambda} = 32$,这对于速度的测量是足够的^[8]。

3 实验结果及讨论

当加在风扇上的电压 $V = 14\text{V}$ 时,所采集到的激光外差原始信号如图 3a 所示,其中 N 代表采样点数。

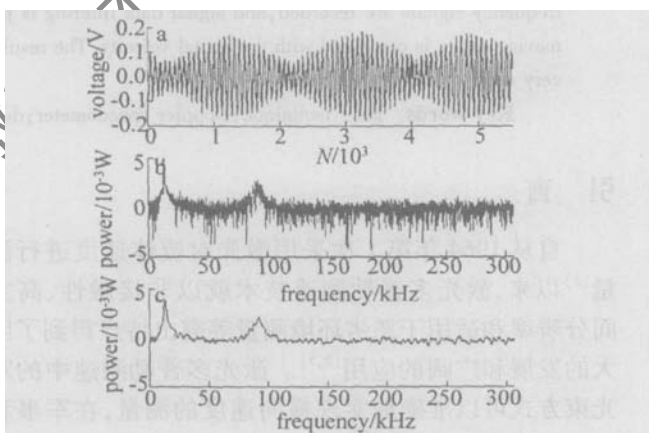


Fig 3 a—collected heterodyne signals b—FFT results c—filtered FFT results

对该信号进行 FFT 处理,将时域信号转换成频域信号,所得结果见图 3b。其中最左端出现的尖峰为外界干扰信号,而接近中间区域出现的波包才是所测量的多普勒频移信号。由图可见,噪声在频域上表现比较强,一定程度上影响了对有用信号的判断,从而影响了计算的准确性。为此,在 MATLAB6.0 下对图 3b 中的数据进行了平滑滤波。平滑滤波就是取一个宽度为 N (例如 N 取 3) 个点的分析窗口,将 N 个点逐点向前移动,每次都取窗口里的平均值作为中间点的输出值,设输入为 $x(n)$,输出为 $y(n)$,输入与输出可以表示为:

$$y_n = \frac{1}{2k+1} \sum_{i=-k}^k x(n+i), (n = 0, 1, 2, \dots) \tag{6}$$

式中, $N = 2k+1$ 为分析窗口的宽度,即每次进行算术平均的点数 ($k = 1, 2, 3, \dots$)。通过这样的处理,相当于

通过了一个低通滤波器,能够滤除高于信号最高频率的高频噪声,也能提高信噪比^[9]。对图 3b 中的数据进行滤波后得到的数据见图 3c。从图中可见,平滑滤波可以有效去除噪声干扰,提高信噪比,使信号在频域表现更平滑,并保持了原信号的特征。

图 3c 中的多普勒频移 $f_D \approx 92\text{kHz}$ 利用 (3) 式可计算出所测量的速度为 $v \approx 4.7\text{m/s}$ 。通过调整电压 V ,可以得到一系列的多普勒频移 f_D 值,从而得到一系列的速度值。如图 4 所示,图中,“曲线 1”为采用双光

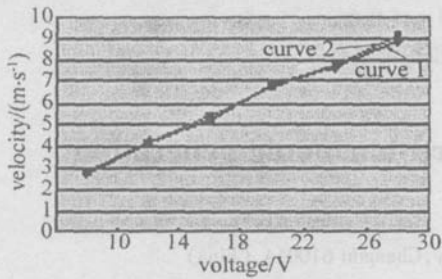


Fig 4 Contrast of the velocity calculated based on the Doppler frequency and the actual velocity

束方式测量到的速度随电压的变化曲线;而“曲线 2”为风扇转速和电压的实际关系曲线。从该图可以看出,本实验中的双光束方式得到的速度大小与实际值相当接近,误差不超过 2.5%。同时,测量过程中,没有出现信号中断或失真,这与测量区足够长有关。根据前面的计算,测量区长度 $l_m = 12.6\text{mm}$,这样,即使风扇的表面形状不够规则或者转动的过程中有轻微的抖动,其表面都能够始终和测量区相交。

不过,因为 CO_2 激光波长较长,测量区内形成的条纹间距比较大,因此,造成测速的误差比使用可见光波段的激光要大一些。另外,中远红外的探测器成本比可见光波段的要高得多,这也是使用 CO_2 激光作为

光源的一个限制因素。

4 结束语

对 CO_2 激光的双光束方式横向测速进行了理论分析和实验研究。采集后向散射光信号,在计算机上进行了实时 FFT 处理,并进行滤波,得到了高信噪比的信号曲线。根据测出的多普勒频移算出的速度大小与实际值偏差在 2.5% 范围以内。最后对实验结果进行了分析和讨论。

参 考 文 献

- [1] DURST F, MELLING A, WITTELA W J H. Principles and practice of laser-Doppler anemometry [M]. Beijing Science Press 1992: 6~7 (in Chinese).
- [2] LU H S, LU B. Latest development of laser Doppler technique in vibration measurement [J]. Laser Technology, 2002, 29(1): 176~179 (in Chinese).
- [3] AUGERE B, CARIOU J. A 1.5 μm CW coherent laser anemometer for in-flight measurements [J]. SPIE, 2003, 5086: 121~128.
- [4] WU L M, YE L H, HE A Z *et al*. Turbulent flow velocity field measurement of recirculation mechanism by LDV [J]. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(6): 29~30 (in Chinese).
- [5] ZOU H, ZHAO Y. Applications of laser Doppler technique in solid surface measurement [J]. Optical Technique, 2000, 26(2): 101~106 (in Chinese).
- [6] CAI X P, ZHAO Y, DAI Y *et al*. CO_2 coherent laser Doppler velocimeter [J]. Infrared Millimeter Waves, 1996, 15(6): 465~468 (in Chinese).
- [7] LI Zh Zh, CAI H, HONG X G *et al*. Two-beam laser Doppler velocity system [J]. Physics Experimentation, 2005, 25(3): 44~47 (in Chinese).
- [8] SHEN X. Laser Doppler velocimetry and its application [M]. Beijing Tsinghua University Press, 2004: 23~32 (in Chinese).
- [9] CHEN Y, WANG Y L, ZHOU D F *et al*. Faint signal processing of lidar based on wavelet multi-resolution analysis [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 278~280 (in Chinese).
- [10] SIEGMAN A E. Laser [M]. California University Science Books Mill Valley, 1986: 644.
- [11] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics [M]. Beijing Science Press, 1979: 54~58 (in Chinese).
- [12] CAO Q, DENG X M, GUO H. Power carried by scalar light beams [J]. Opt Commun, 1998, 151: 212~216.
- [13] BEYER W H. Standard mathematical tables and formulae [M]. 29th ed. Boca CRC Press, 1991: 378.
- [14] LÜ B D. Laser optics [M]. 3rd ed. Beijing Higher Education Press, 2003: 105 (in Chinese).
- [15] PORRAS M A. Non-paraxial vectorial moment theory of light beam propagation [J]. Opt Commun, 1996, 127: 79~95.
- [16] DUAN K L, LÜ B D. Non-paraxial Hermite-Gaussian beams and their higher-order corrections [J]. Laser Technology, 2003, 27(2): 155~157 (in Chinese).
- [17] PORRAS M A. Finiteness and propagation law of the power density second-order moment for diffracted scalar light beam [J]. Optik, 1999, 110(9): 417~420.

参 考 文 献

(上接第 182 页)

数,来计算任意阶的非傍轴旋转对称 LG 光束的发散角。