

# 高精度 1.55 $\mu\text{m}$ 全光纤激光相干测速实验及数据分析

王希涛<sup>1</sup> 刘秉义<sup>1\*</sup> 吴松华<sup>1</sup> 姚琪<sup>2</sup> 李志刚<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266003  
<sup>2</sup>中国电子科技集团公司第十四研究所, 江苏 南京 210039)

**摘要** 介绍了一种高精度 1.55  $\mu\text{m}$  全光纤激光相干测速实验系统。实验系统采用光纤激光器作为激光源, 利用光纤环形器与望远镜构成收发合置的光学天线, 所有光学器件由单模光纤连接。数据处理采用快速傅里叶变换 (FFT) 频谱分析方法检测信号多普勒频移。利用该系统对转盘进行多次测速实验, 速率测量的相对误差小于 0.2%。同时对基于光纤激光器相干探测的主要低频噪声本振光强度噪声进行详细讨论, 通过抽运驱动电流内调制法抑制本振光强度噪声后, 系统的低速多普勒信号探测能力可提高 2 个数量级。

**关键词** 相干光学; 相干激光雷达; 外差检测技术; 测速; 信噪比

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.060301

## 1.55 $\mu\text{m}$ All-Fiber Laser Heterodyne Detection and Data Analysis with High Measurement Accuracy of Velocity

Wang Xitao<sup>1</sup> Liu Bingyi<sup>1\*</sup> Wu Songhua<sup>1</sup> Yao Qi<sup>2</sup> Li Zhigang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)  
(<sup>2</sup>The 14th Research Institute of Chinese Electronic Technology Company, Nanjing, Jiangsu 210039, China)

**Abstract** A 1.55  $\mu\text{m}$  all-fiber coherent laser demo system for high accuracy velocity measurement is presented. A 1.55  $\mu\text{m}$  fiber laser is used as the transmitter. A fiber optical circulator and a telescope are used as the optical antenna. All optical devices are connected by single mode fiber. The signal and local oscillator (LO) filed are well matched with this system. Fast Fourier transform (FFT) is used to derive the signal Doppler shift. The experimental results indicate that the demo system can measure the target velocity accurately, the relative error of velocity is less than 0.2%. Besides, the problem from LO power intensity noise is discussed. The low-speed Doppler signal detection ability is improved by two orders of magnitude as a result of LO power intensity noise suppressed by pumping current modulation.

**Key words** coherence optics; coherent lidar; optical heterodyne detection; velocity measurement; signal to noise ratio

**OCIS codes** 030.1640; 040.2840; 060.2430

## 1 引言

激光多普勒测速技术近年来发展迅速, 广泛应用于风速、大气湍流和风切变的监测中。激光多普勒测速技术分为直接探测和相干探测两种<sup>[1]</sup>。相干探测技术由于其探测精度高, 集成化容易, 成为近些年来研究的热点<sup>[2]</sup>。近些年来, 我国已开展基于 CO<sub>2</sub> 激光器和固体激光器相干探测技术的研究, 但是两束空间光相干的苛刻条件, 成为这两种技术发展上的障碍<sup>[3]</sup>。然而, 随着光纤技术的迅速发展, 光纤激光器技术逐渐成熟,

收稿日期: 2010-12-13; 收到修改稿日期: 2011-02-28; 网络出版日期: 2011-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (40905005), 国家 863 计划 (2006AA12Z155) 和灾害天气国家重点实验室开放课题 (2008LASW-B04) 资助课题。

作者简介: 王希涛 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气激光雷达方面的研究。E-mail: wangxitao1985@gmail.com

导师简介: 刘智深, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: zslu@ouc.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: liubingyi@ouc.edu.cn

采用全光纤结构的激光多普勒相干测速系统具有相干效率高、光路调节简单、系统稳定性和集成化程度高等优点,将成为下一个研究的热点<sup>[4]</sup>。本文采用全光纤结构搭建激光相干测速实验系统,利用频谱分析的数据处理算法实现对转盘的高精度测速。

## 2 激光相干测速系统

### 2.1 高精度全光纤激光相干测速实验系统方案

全光纤激光相干测速实验系统的激光器采用窄线宽单模光纤激光器,输出连续光功率 64 mW,波长 1550 nm,激光线宽小于 10 kHz。光学望远镜接收孔径 8 cm。光电探测器采用高速 PIN 管,响应率 0.9 A/W,前置放大器带宽 100 MHz,数据采集设备的采样率可调,最高 5 GS/s。全光纤激光相干测速实验系统结构如图 1 所示。

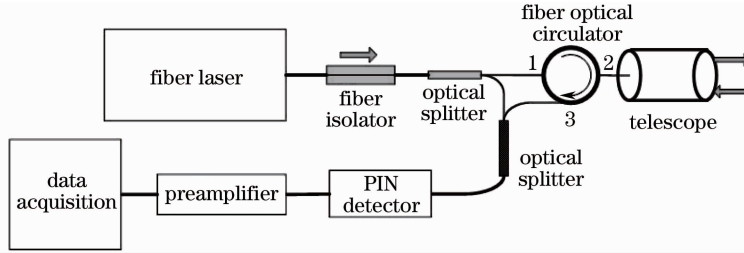


图 1 全光纤激光相干测速系统框图

Fig. 1 Architecture of all-fiber coherent laser demo system for velocity measurement

光纤激光器输出的光首先经过光纤隔离器,光纤隔离器可以避免后续光路系统的光耦合回光纤激光器,造成激光器的损伤。从隔离器输出的光分成两束,一束作为本振光,一束作为信号光。信号光经过光纤环行器的端口 1 至端口 2,由望远镜发射。物体漫反射回的信号光,由望远镜接收,经光纤环行器的端口 2 至端口 3,与本振光经分支器耦合后在高速 PIN 管探测器表面混频。混频产生的中频电信号,经前置放大器的放大滤波,由数据采集卡采集处理。系统所有光学器件全部采用单模光纤连接,单模光纤具有良好的空间滤波特性,可以将相干光波前误差转化为功率的扰动,利用功率平均的方法可消除相干光波前误差对系统的影响,提高信号光与本振光的混频效率<sup>[5]</sup>。

### 2.2 激光相干测速基本原理

激光相干测速是利用运动物体对信号光的多普勒效应,将频率已经发生变化的信号光进行收集,与本振光在探测器表面进行混频,由探测器得到两者的差频信息  $\Delta f$ ,根据多普勒频移与运动物体速度间的关系

$$\Delta f = \frac{2v \cos \theta}{\lambda}, \quad (1)$$

可以推导出物体的运动速度<sup>[6]</sup>。(1)式中  $\Delta f$  为多普勒频移, $v$  为运动物体的速度, $\theta$  为物体运动速度与激光视线方向的夹角, $\lambda$  为发射激光的波长。

激光相干测速中,本振光与回波信号光的电场分别为

$$e_1(t) = E_1 \cos(2\pi f_0 t + \Phi_1), \quad (2)$$

$$e_s(t) = E_s \cos[2\pi(f_0 + \Delta f)t + \Phi_s], \quad (3)$$

式中, $f_0$  为激光器本振频率, $\Phi_1, \Phi_s$  分别为本振光与信号光的相位。根据光电探测器的平方率响应特性,输出光电流为

$$i(t) = D[e_s(t) + e_1(t)]^2 = D \left\{ \frac{E_s^2}{2} + \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_s^2}{2} \cos 2[2\pi(f_0 + \Delta f)t + \Phi_s] + \frac{E_1^2}{2} \cos 2(2\pi f_0 t + \Phi_1) + E_s E_1 \cos[2\pi(\Delta f + 2f_0)t + \Phi_s + \Phi_1] + E_s E_1 \cos(2\pi \Delta f t + \Phi_s - \Phi_1) \right\}, \quad (4)$$

式中  $D$  为光电探测器的响应率。由于光电探测器响应带宽的限制,光电流的高频分量将得不到响应,因此,光电流的实际输出为

$$i(t) = I_s + I_1 + 2 \sqrt{I_s I_1} \cos(2\pi \Delta f t + \Phi_s - \Phi_1). \quad (5)$$

滤除信号光与本振光产生的直流电流  $I_s$  与  $I_1$ , 利用快速傅里叶变换(FFT)频谱分析方法检测出中频信号的谱峰, 计算谱峰的频移  $\Delta f$ , 然后根据(1)式, 可以推导出物体的运动速度<sup>[7]</sup>。

### 3 测速实验

全光纤激光相干测速实验的系统图如图2所示。选用可调速永磁同步电机, 电机的转速误差小于  $0.05 \text{ r/min}$ 。望远镜发射激光打在转盘上, 同时接收信号光, 激光束的视线方向与转盘的线速度方向夹角  $\theta = 45^\circ$ <sup>[8]</sup>。本文实验系统利用光电测速器测量转盘的实际线速率。随着转盘的转动, 光电测速器产生周期的通断信号, 测量周期  $T$ , 可推导出转盘的线速率为

$$v = \frac{2\pi r}{T}, \quad (6)$$

式中  $r$  为转盘的半径, 本文实验系统中  $r = 0.1280 \text{ m}$ 。

图3给出转盘线速率  $v = 4.516 \text{ m/s}$  (激光束视线方向速率分量  $v_{\text{LOS}} = 3.194 \text{ m/s}$ ) 时测量的实验数据。图4是对图3时域信号的局部放大, 由图4可以看到清晰的拍频信号。图5(a)是信号的频域信息, 可以看到非常明显的多普勒频移信息 ( $\Delta f = 4.125 \text{ MHz}$ )。由(1)式计算转盘线速率  $v_m = 4.522 \text{ m/s}$ , 速率测量误差  $\Delta v = v_m - v = 0.006 \text{ m/s}$ 。

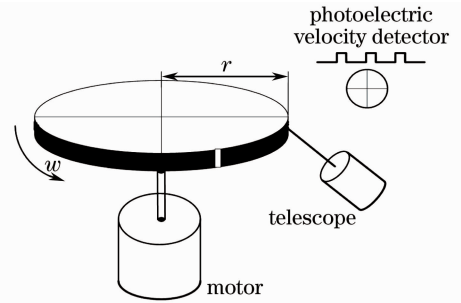


图2 测速实验示意图

Fig. 2 Schematic of velocity measurement

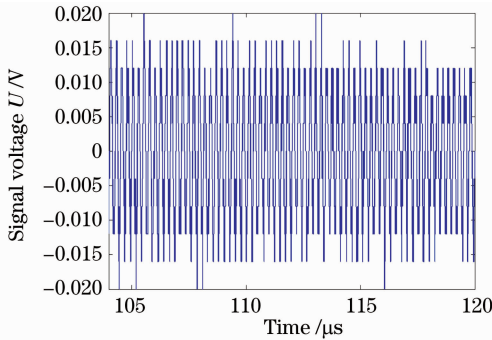


图3 转盘线速率  $v = 4.516 \text{ m/s}$  时域信号

Fig. 3 Time domain signal with  $v = 4.516 \text{ m/s}$

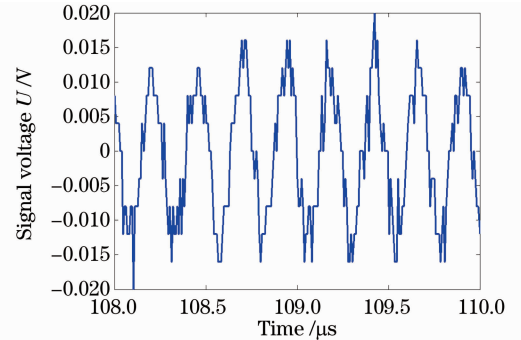


图4 转盘线速率  $v = 4.516 \text{ m/s}$  时域局部放大

Fig. 4 Zoom in time domain signal with  $v = 4.516 \text{ m/s}$

图5(b)~(d)分别给出转盘线速率  $v = 0.9218, 8.910, 17.09 \text{ m/s}$  时相干信号的频谱图, 数据记录时间长度  $0.8 \text{ ms}$ , 数据采样率  $50 \text{ MHz}$ 。由频谱分析的方法检测出信号的多普勒频移分别为  $0.8400, 8.140, 15.56 \text{ MHz}$ , 根据(1)式计算出转盘的测量线速率分别为  $0.9208, 8.923, 17.06 \text{ m/s}$ , 3次速率测量的相对误差均小于  $0.2\%$ 。

由于选用电机的最大转速误差  $\Delta\omega = 0.05 \text{ r/min}$ , 由(6)式计算电机引起的转盘线速率误差  $\Delta v < 0.67 \text{ mm/s}$ , 不会影响系统的测量精度。多次的实验测量证明, 全光纤激光相干测速实验系统具有较高的混频效率, 能够获得稳定的混频信号, 速率测量的精度高, 相对误差小于  $0.2\%$ 。

### 4 信噪比分析及噪声抑制

激光相干测速系统噪声主要包括本振光与信号光产生的散粒噪声  $N_{\text{shot}}$ , 系统的热噪声  $N_{\text{thermal}}$ , 探测器暗噪声  $N_{\text{dark}}$ , 本振光强度噪声  $N_{\text{intensity}}$ <sup>[9]</sup>。在基于光纤激光器的相干测速系统中, 在低频区本振光强度噪声往往高出其他噪声几个数量级, 是系统低频区的主要噪声<sup>[10]</sup>。本振光强度噪声是由光纤激光器自身相对强度噪声(RIN噪声)引起的, 本振光强度噪声的功率谱峰值往往出现在几兆赫兹的低频, 严重影响系统对低速多普勒信号的检测。

$$N_{\text{intensity}} = N_{\text{RIN}} \times B \times D^2 \times \overline{P_L^2} \times R_L, \quad (7)$$

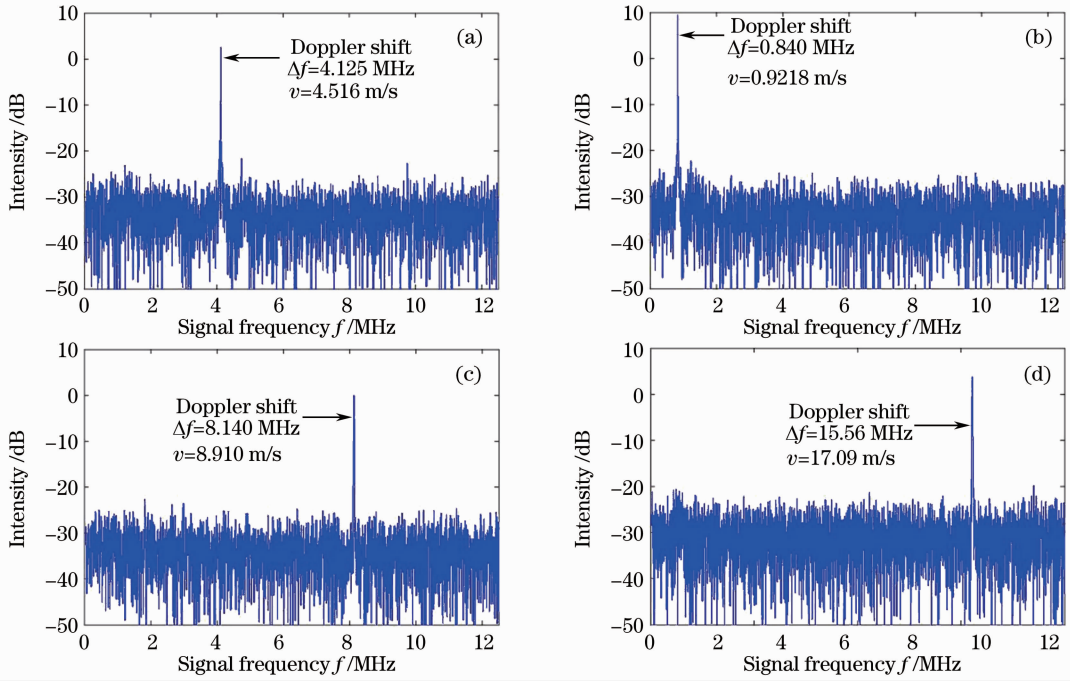
图5 不同转盘速率  $v$  相干信号的对应频谱

Fig. 5 Frequency domain signal with different disk velocities

式中  $N_{\text{RIN}}$  为 RIN 噪声,  $B$  为探测器带宽,  $\overline{P_L}$  为本振光平均功率,  $R_L$  为探测器负载电阻。

数据处理时将信号由时域转换到频域分析, 检测多普勒信号谱峰的频移, 在频域内分析系统的窄带信噪比能够直观反映系统的探测能力<sup>[9]</sup>。系统的窄带信噪比

$$R_{\text{SNR}} = \frac{2D^2 \chi P_L P_s}{NB}, \quad (8)$$

式中  $\chi$  为混频的效率,  $P_L$  和  $P_s$  分别为本振光与信号光功率,  $N$  为噪声功率谱密度,  $B$  为多普勒信号谱峰宽度。为了保证系统测速精度, 通常选取信号窄带信噪比大于 10 dB。

抑制 RIN 噪声的方法很多, 本文系统选用抽运电流内调制方法, 利用光电探测器实时检测输出光功率的变化反馈控制激光器抽运电流, 维持稳定的输出光功率。该方法可使输出激光弛豫振荡峰附近的强度噪声下降 25~30 dBm。分别在抑制 RIN 噪声前后进行多次相干测速对比实验, 分析系统对低速多普勒信号探测能力。图 6, 7 分别为本振光功率 0.17 mW, 转盘线速率 1.425 m/s (激光束视线方向速率分量  $v_{\text{LOS}} = 1.008$  m/s), RIN 噪声抑制前后测得混频信号的功率谱密度图。图 6 为 RIN 噪声抑制前, 在 1~1.5 MHz 范围内, 噪声功率明显增大, 干扰了多普勒信号谱峰的检测, 信号窄带信噪比  $R_{\text{SNR}} \approx 10$  dB, 此时信号功率接近系统的最小可探测功率。图 7 为 RIN 噪声抑制后, 噪声的峰值功率下降 2 个数量级, 可以看到清晰的多

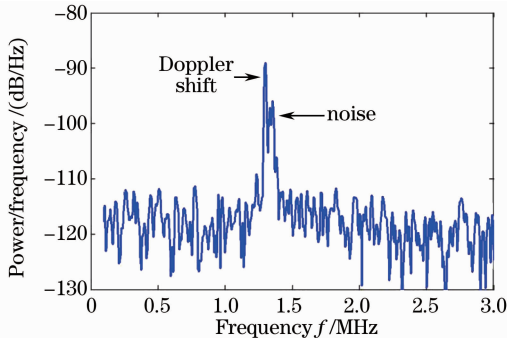


图6 RIN 噪声抑制前信号功率谱密度图

Fig. 6 Signal power spectral density without RIN suppression

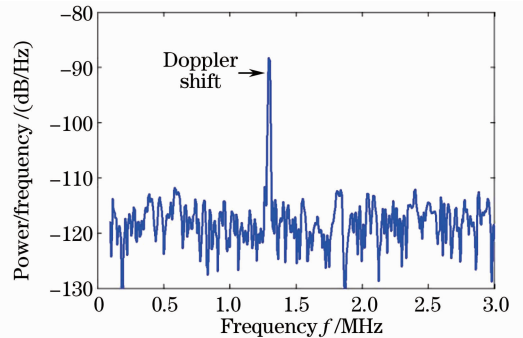


图7 RIN 噪声抑制后信号功率谱密度图

Fig. 7 Signal power spectral density with RIN suppression

普勒信号谱峰,系统的最小可探测信号功率减小 2 个数量级。由两个图的对比很容易发现,抑制本振光强度噪声后,系统对低速多普勒信号的探测能力提高 2 个数量级。

经过多次实验证明,抑制本振光强度噪声能大幅度提高系统对低速多普勒信号的探测能力。当然,除了在激光源处抑制 RIN 噪声外,信号检测电路采用平衡探测器同样可以滤除本振光强度噪声,同时可以直接滤除混频产生的直流电流,简化信号检测电路设计。总之,本振光在放大信号光的同时也会引入强度噪声,本振光功率的选取是激光相干测速系统设计中需要重点关注的问题。

## 5 结 论

全光纤激光相干测速实验系统所有光学器件采用单模光纤连接,具有集成化程度高,光路调节简单的优点。经过多次测速实验证明,本文系统速率测量相对误差小于 0.2%,在抑制本振光强度噪声后,系统对于低速多普勒信号的探测能力可提高 2 个数量级,系统的混频效率高而且混频波形稳定,能够稳定精确的测量运动物体速率。当然要实现工程化应用,该实验系统还应增加声光调制器(AOM)移频器对本振光进行调制以便获得速度的方向信息,这也正是下一步实验系统改进的重点。

## 参 考 文 献

- 1 Zhishen Liu, Dong Wu, Jintao Liu *et al.*. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 7079~7086
- 2 Fu Yang, Yan He, Jianhua Shang *et al.*. Development of an all-fiber heterodyne lidar for range and velocity measurements [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(7): 713~716
- 3 Zhang Haiyang, Zhao Changming, Jiang Qijun *et al.*. Detection of Doppler signal of moving target using 1.06  $\mu\text{m}$  coherent detection lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 507~510  
张海洋, 赵长明, 蒋奇君 等. 1.06  $\mu\text{m}$  相干激光雷达动目标多普勒信号探测[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 507~510
- 4 S. Kameyama, T. ando, K. asaka *et al.*. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(11): 1953~1962
- 5 Zongheng Ma, Chunxi Zhang, Pan Ou *et al.*. Applications of fiber interferometer in coherent Doppler lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 261~263
- 6 Zhang Fangpei, Xue Haizhong, Hu Yongzhao *et al.*. Coherent Doppler wind lidar[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(6): 1045~1050  
张芳沛, 薛海中, 胡永钊 等. 相干多普勒测风激光雷达[J]. *应用光学*, 2009, **30**(6): 1045~1050
- 7 Yang Suihui, Jiang Qijun, Zhang Haiyang *et al.*. Signal processing in solid-state coherent lidar using Labview[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, **28**(12): 1105~1112  
杨苏辉, 蒋奇君, 张海洋 等. 基于 Labview 的固体相干激光雷达多普勒测速的信号处理[J]. *北京理工大学学报*, 2008, **28**(12): 1105~1112
- 8 R. M. Hardesty, R. J. Keeler, M. J. Post *et al.*. Characteristics of coherent lidar returns from calibration targets and aerosols[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(21): 3763~3769
- 9 Christer J. Karlsson, Fredrik A. A. Olsson, Dietmar Letalick *et al.*. All-fiber multifunction continuous wave coherent laser radar at 1.55  $\mu\text{m}$  for range, speed, vibration, and wind measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21): 3716~3726
- 10 Peter John Rodrigo, Christian Pedersen. Reduction of phase-induced intensity noise in a fiber-based coherent Doppler radar using polarization control[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 5320~5327