

1.55 μm 全光纤相干多普勒激光测风雷达

胡 杨^{1,2}, 朱鹤元¹

(1. 复旦大学 光科学与工程系, 上海 200433; 2. 上海秉睿实业有限公司, 上海 201800)

摘要: 激光雷达是一种精确的遥感风速测量方法。介绍了一种全光纤相干多普勒激光测风雷达, 系统所有光学元件之间采用光纤连接, 结构简单, 调节方便。首先, 使用该激光雷达系统的信号处理方法, 对计算机模拟的探测器表面的中频多普勒频移信号进行测量, 噪声的功率越大, 信噪比越小, 误差也越大。其次, 使用该激光雷达系统对硬靶目标进行了速度测量, 测量结果与标准值比较一致, 最大误差的绝对值不超过 0.046 m/s。最后, 使用该激光雷达系统对水蒸气目标进行了速度测量, 测量结果与标准值基本相近, 最大误差的绝对值小于等于 0.925 m/s。仿真和实际实验的测量结果均证明了该激光雷达系统测量结果的准确性和稳定性。

关键词: 激光雷达; 全光纤; 多普勒频移; 测风

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S130001

1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement

Hu Yang^{1,2}, Zhu Heyuan¹

(1. Department of Optics Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Shanghai Binrry Industrial Co., Ltd, Shanghai 201800, China)

Abstract: Light detection and ranging (LiDAR) offers a method of remote wind speed measurement. A kind of all-fiber coherent Doppler lidar was proposed, whose components were connected via optical fibers. The simplicity of the structure is quite convenient for adjustment. First, the signal processing method used in this system was used to measure the simulated Doppler shift. The simulation results indicate that the more noise is added to the signal, the more errors will be obtained from the calculation. Second, the lidar system was utilized to measure the velocity of a hard target. The results conform very closely to the reference, whose absolute errors are less than 0.046 m/s. Finally, the lidar system was used to measure the speed of the water steam. The results deviate from the reference more than that of a hard target, whose maximum absolute error rises up to 0.925 m/s. The simulation and experiment results validate the accuracy and stability of the lidar system.

Key words: light detection and ranging(LiDAR); all-fiber; Doppler shift; wind measurement

收稿日期: 2016-02-07; 修订日期: 2016-03-10

作者简介: 胡杨(1983-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达等方面的研究。Email: shorepoplar@126.com

导师简介(通讯作者): 朱鹤元(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事新型激光技术与器件等方面的研究。

Email: hyzhu@fudan.edu.cn

0 引言

激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)是一种精确的遥感风速测量方法,利用大气中空气分子或气溶胶的后向散射特性,实现对大气风速、风向、切变、湍流等诸多气象参数的实时测量^[1-3]。通过对大气风场的观测,能够为人类的生产和生活提供许多有用的信息。例如,通过对机场上空的风切变进行实时监测,能够确保飞机起飞和降落过程的安全;通过对风机未来风场的流动分布进行实时监测,能够有效提高风力发电的效率。因此,大气风场的准确测量越来越受到国际社会的广泛关注。

激光雷达的广泛应用目前为止主要还是受制于自身的高昂成本和复杂结构^[4]。近年来,受益于光通信技术及其器件的快速发展,激光雷达在成本控制和可靠性等方面均取得了长足的进步^[5]。全光纤相干多普勒激光雷达具有测量精度高、重复性和稳定性好、系统方便灵活等特点^[6-7]。

文中介绍了一种全光纤相干多普勒激光测风雷达。整套系统采用光纤激光器作为光源,光源波长为 1 550 nm,满足对人眼的安全技术要求;采用环形器配合可调焦的透镜从而实现收发合置的光学天线;采用平衡探测器在实现对时域中频信号的采集,抑制系统噪声,提高系统信噪比;采用快速傅里叶变换的方法将时域信号转换到频域信号,实现对多普勒频移的精确测量;系统所有光学元件之间采用光纤连接,结构简单,调节方便。

使用该激光雷达系统分别对硬靶目标和水蒸气目标进行了速度测量。仿真和实际实验的测量结果均证明了该激光雷达系统测量结果的准确性和稳定性。

1 原理

多普勒效应的主要内容为:物体辐射的波长会随着波源和观测者之间的相对运动而产生相应变化。在运动的波源前面,波被压缩,波长变得较短,频率变得较高,即所谓的蓝移;在运动的波源后面,波被拉伸,波长变得较长,频率变得较低,即所谓的红移;波源的速度越快,所产生的频移也越大。根据频移的程度大小可以计算出波源循着观测方向运动的速度^[8]。

激光雷达测量物体速度的原理为:一束相干光照在目标上,一小部分光被其后向反射回探测器^[9]。目标沿着光束方向的移动将会因为多普勒效应的关系产生光频率的变化,公式如下:

$$|\delta\nu| = \frac{2V_{\text{LOS}}}{c} \gamma = \frac{2V_{\text{LOS}}}{\lambda}$$

式中: c 为光速(3×10^8 m/s); V_{LOS} 为目标速度沿着视线方向的分量(即光束方向); γ 和 λ 分别为激光频率和波长。

通过将回波信号与部分本征光信号进行混频^[10],在光电探测器上差频处产生拍频响应,原理如图 1 所示。

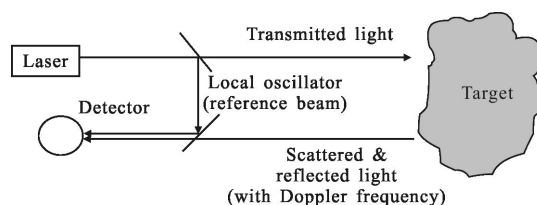


图 1 相干激光雷达测量原理^[1]

Fig.1 Principle of coherent Doppler lidar

2 方法

全光纤相干多普勒激光测风雷达的总体结构如图 2 所示。

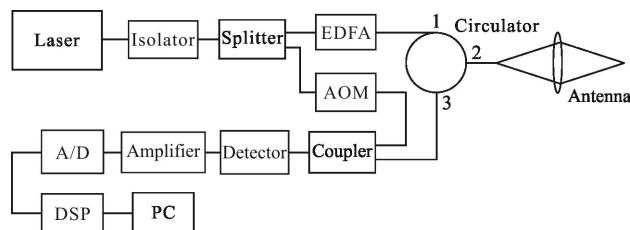


图 2 全光纤激光测风雷达的总体结构

Fig.2 Structure of all-fiber coherent Doppler lidar

人眼安全的 1 550 nm 窄线宽激光器输出的连续光首先经过光纤隔离器,光纤隔离器可以避免系统后续光路的光耦合回激光器,造成激光器的损坏。经过隔离器的光被分束器分为两路,一路光经过声光调制器(AOM),作用是使发射信号产生一个固定的频率偏置,并作为本振光进入耦合器;另一路光首先经过掺铒光纤放大器(EDFA),放大后的激光从 1 端口耦合进入光纤环形器,并从 2 端口输出,耦合进入一收发合一的光学天线,向目标空域聚焦发射。

通过天线发射到目标空域的激光经过大气气溶胶散射后由天线接收其回波信号，后进入光纤环形器，并由 3 端口输出进入耦合器。本振光和信号光在耦合器内进行混频，混频信号由光电探测器进行接收，并提取相干外差的中频信号。该信号经过放大器进一步放大，通过 A/D 转换，最后经过专用的高速信息处理电路进行滤波、FFT^[11]、累加、平均等处理，即可检测出该相干信号的频率值，从而得到所探测空域聚焦点处沿光束方向的径向风速的大小。

3 实验

3.1 仿真实验

在不同噪声的条件下，可以使用计算机仿真生成其在探测器面上的时域信号。在不考虑噪声的条件下，仿真生成的时域信号如图 3(a)所示。

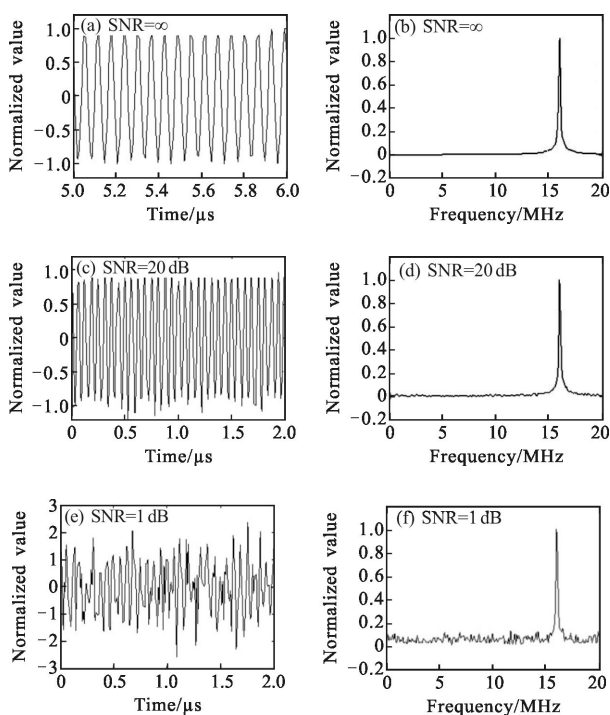


图 3 不同信噪比下的仿真结果

Fig.3 Simulation results under different SNR

此时，仿真信号参数设定为方向角 $\theta=0^\circ$ ，波长 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ ，可以理论计算得到仿真物体的速度为 $12.419\ \text{m/s}$ 。对时域信号作傅里叶变换，相应的频域信号如图 3(b)所示。因为不存在噪声的影响，多普勒频移能够被精确测定，此时测量得到物体的速度为 $12.419\ \text{m/s}$ ，与理论计算结果完全一致。

为了考察雷达系统在实际噪声条件下的表现，在时域信号中加入不同功率大小的噪声，如图 3(a)、(c)和(e)所示。相应的测量结果如表 1 所示。

表 1 不同信噪比下的测量结果

Tab.1 Measurement results under different SNR

SNR/dB	Velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Error/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
∞	12.419	0.000
20	12.438	0.019
1	12.371	-0.048

随着时域信号中噪声功率逐渐增加，即系统的信噪比逐渐减小，由雷达系统得到的测量结果的误差也会越大，原因是噪声将会直接影响系统对多普勒频移的精确测量。

因此，为了尽量减少系统的测量误差，应该尽可能提高探测器表面的信号功率，降低噪声功率。一般的，可以通过提高激光器的光功率或采用透镜聚焦的方法提高信号光在待测物体表面的强度，从而提高回波信号的功率^[12]。

3.2 实际实验

3.2.1 硬靶实验

硬靶实验的装置结构如图 4 所示。

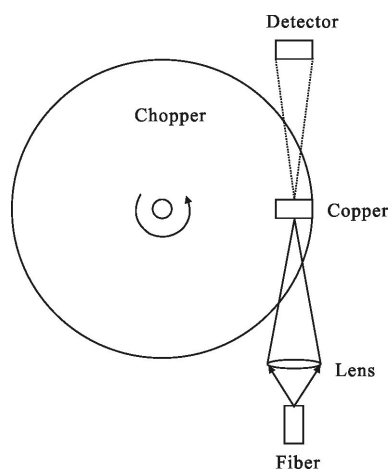


图 4 硬靶实验的装置结构

Fig.4 Experimental setup for hard target

使用高采样率的数字多用表采集探测器表面的激光周期信号，通过计算信号的周期可以精确得到斩波器的实际转速，从而计算得到铜片出的速度，并将此种方法得到的速度值作为速度标准值。

通过调整斩波器的控制器可以实现对斩波器转速的控制。在不同的转速下,使用激光雷达系统对铜片速度进行测量,得到的时域信号分别如图 5(a)、(c)和(e)所示。

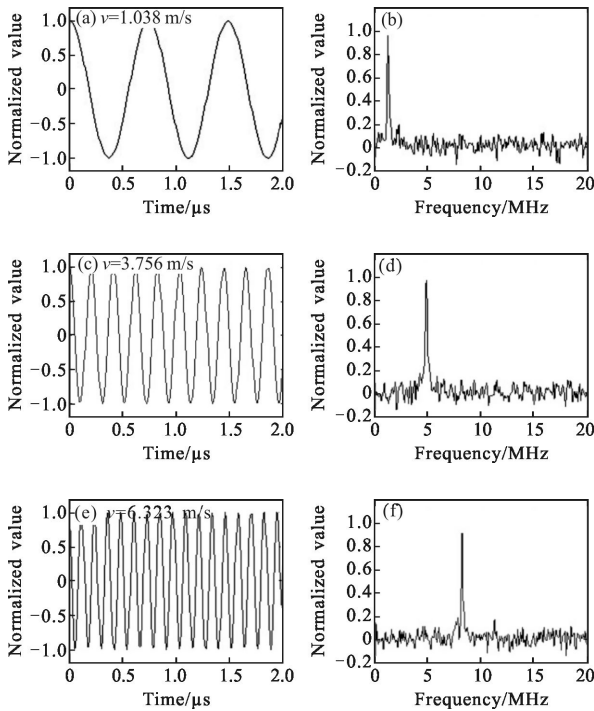


图 5 激光雷达硬靶实验结果

Fig.5 Experimental results of LiDAR hard target

时域信号经过快速傅里叶变换可以得到多普勒频移信号,如图 5(b)、(d)和(f)所示。相应的硬靶实验结果如表 2 所示。

表 2 激光雷达硬靶实验结果

Tab.2 Experimental results of LiDAR hard target

Reference/ $m \cdot s^{-1}$	Measurement/ $m \cdot s^{-1}$	Error/ $m \cdot s^{-1}$
1.038	1.044	0.006
3.756	3.730	-0.026
6.323	6.369	0.046

实验结果表明,使用激光雷达得到的铜片速度测量值与使用探测器得到的铜片速度标准值符合的比较一致。其中,两者之间最大误差的绝对值不超过 0.046 m/s。

在斩波器转速较低时运行也较平稳,其上铜片的旋转也较稳定,此时,激光雷达的测量结果与标准值之间的误差较小;随着斩波器转速的加快,运行也逐渐剧烈,其上铜片的旋转也更加不稳定,造成激光

雷达的测量结果与标准值之间的误差增加。特别的,当斩波器的转速达到最大时,两者之间的误差也达到最大值。

3.2.2 水蒸气实验

水蒸气实验的装置结构如图 6 所示。

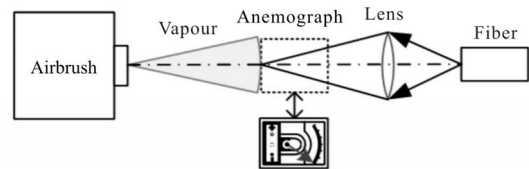


图 6 水蒸气实验的装置结构

Fig.6 Experimental setup for water steam

将风速计置于喷枪的阀门附近,打开风速计的开关,测量由喷枪阀门喷出的水蒸气的速度。文中将此种方法得到的速度值作为水蒸气速度的标准值。

移开风速计,使用全光纤相干多普勒激光雷达对水蒸气的速度进行测量,得到的多普勒频移信号如图 7 所示。

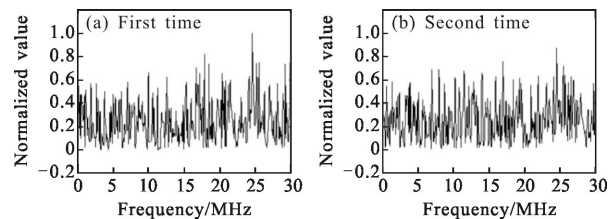


图 7 水蒸气速度的测量值

Fig.7 Experimental results of water steam

两次测量得到的多普勒频移信号略有不同,相应的速度测量值分别为 18.975 m/s 和 19.138 m/s。一方面,两次测量结果证明了激光雷达系统具有较好的重复性;另一方面,与硬靶实验测量结果相比,信号的信噪比有明显下降,原因是水蒸气的后向散射较硬靶材料相比有所下降。

风速计测量得到的水蒸气速度的标准值为 19.9 m/s。使用激光雷达得到的水蒸气速度测量值与使用风速计得到的铜片速度标准值基本相近。误差主要来源于喷枪喷发出的水蒸气速度的不均匀性。

4 结论

文中介绍了一种全光纤相干多普勒激光测风雷达。

首先,对计算机仿真生成的多普勒频移信号进行测量。在无噪声的条件下,测量结果与标准值一致;在有噪声的条件下,测量结果与标准值之间存在误差;噪声的功率越大,信噪比越小,误差也越大。

其次,对硬靶目标进行了速度测量,结果表明:一方面,测量值与标准值符合的比较一致,最大误差的绝对值不超过 0.046 m/s;另一方面,随着硬靶速度的不断提高,测量值与标准值之间的误差也随之增加,在硬靶速度达到最大时,两者之间的误差也达到最大。

最后,对水蒸气目标进行了速度测量,结果表明:由激光雷达得到的测量结果与标准值基本相近,误差主要来源于喷发出的水蒸气速度的不均匀性。

仿真和实际实验的测量结果均证明了文中雷达系统测量结果的准确性和稳定性。

参考文献:

- [1] Harris M, Hand M, Wright A. Lidar for turbine control[R]. US: National Renewable Energy Laboratory, 2006.
- [2] Hu Qi. Study on wind-shear forecast based on Doppler weather radar [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
胡琦. 基于多普勒气象雷达的风切变预测研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [3] Courtney M, Wagner R, Lindelöw P. Testing and comparison of lidars for profile and turbulence measurements in wind energy [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2008, 1(1): 012021.
- [4] Karlsson C J, Olsson F A, Letalick D, et al. All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 m for range, speed, vibration, and wind measurements [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(21): 3716–3726.
- [5] Ando T, Kameyama S, Hirano Y. All-fiber coherent Doppler LIDAR technologies at Mitsubishi Electric Corporation [C]// IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2008, 1(1): 012011.
- [6] Kameyama S, Ando T, Asaka K, et al. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. *Appl Opt*, 2007, 46: 1953–1962.
- [7] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720–1724. (in Chinese)
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1720–1724.
- [8] Dai Yongjiang. Light Detection and Ranging Technoledge [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [9] Diao W, Zhang X, Liu J, et al. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 072801.
- [10] Jia Xiaodong. Development of 1.55 μm Coherent Lidar For Wind Sensing [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
贾晓东. 1.55 μm 相干测风激光雷达样机的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [11] Zhao Pei'e, Luo Xiong, Cao Wenyong, et al. Using Zoom FFT to improve the spectrum resolution of coherent wind laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 98–102. (in Chinese)
赵培娥, 罗雄, 曹文勇, 等. 应用 Zoom FFT 方法提高相干测风激光雷达频谱分辨率 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 98–102.
- [12] Wang Xitao. The research of all-fiber laser heterodyne detection for velocity measurement [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese)
王希涛. 全光纤激光相干测速技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.