连续相干探测激光风速仪设计与测试

蒋 杉[1,2],孙东松[1],韩於利[1],韩 飞[1],周安然[1],郑 俊[1],唐 磊[2]

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230031;
2. 合肥师范学院 物理与材料工程学院, 安徽 合肥 230031)

摘 要:为实现近距离风场的精确实时观测,基于连续相干探测技术,选取人眼安全的 1.55 μm 为工作波长,设计了一台激光风速仪。系统光路采用全光纤结构增强运行稳定性,望远镜采用同轴透射式结构,有效口径为 70 mm,测量光束聚焦距离为 80 m。利用 A/D 采集卡上板载现场可编程门阵列芯片处理大气回波信号,并设计了谱质心算法估计径向风速,提高了系统运行的精确性和实时性。长期径向风速测量结果表明,所设计激光风速仪输出信号稳定,时间分辨率为 1 s,风速测量范围下限约为 0.915 m/s。与一台校准过的脉冲相干测风激光雷达进行对比实验, 两设备测得风速数据相关系数为 0.997,标准差为 0.090 m/s,最大相差 0.480 m/s。

关键词:遥感; 风速仪; 连续激光; 相干探测
中图分类号:TN958 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.1203008

Design and test of laser anemometer based on continuous wave coherence detection

Jiang Shan[1,2], Sun Dongsong[1], Han Yuli[1], Han Fei[1], Zhou Anran[1], Zheng Jun[1], Tang Lei[2]

(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China;
2. School of Physics and Material Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to implement measurement of the close wind field accurate and real-time, a laser anemometer based on CW coherence detection was designed with eye-safe band 1.55 μm. The system optical path employed the all-fiber structure to enhance the operational stability. The telescope adopted a coaxial transmission structure with effective aperture of 70 mm and focusing distance of 80 m. The backscattered signals were processed by using the on-board programmable gate array chip on the A/D capture card and spectral centroid algorithm was also designed for wind velocity estimation. The anemometer realized high real-time and reliability. The long-term radial wind speed measurement results proved that the laser anemometer output signal was stable with a time resolution of 1 s and the lower limit of the wind measurement range was about 0.915 m/s. Compared with a calibrated pulsed coherent wind lidar, the correlation coefficient of wind speed data measured by the two devices was 0.997, the standard deviation was 0.090 m/s, and the maximum difference was 0.480 m/s.

收稿日期:2019-06-06; **修订日期**:2019-07-05
基金项目:国家自然科学基金(41774193,41574180);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0724)
作者简介:蒋杉(1985-),男,讲师,博士生,主要从事光电检测与控制、激光遥感等方面的研究。Email:wdjiangshan@126.com
导师简介:孙东松(1962-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光遥感方面的研究。Email:sds@ustc.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Key words: remote sensing; anemometer; continuous wave laser; coherence detection

0 引 言

随着激光技术和遥感技术的逐渐发展成熟，无论脉冲相干还是连续相干测量都已经达到了风场观测要求。脉冲相干激光雷达以高精度、高时空分辨率、大范围探测的性能成为风场主动观测的重要手段[1]。相比于脉冲相干激光雷达，连续相干激光雷达近距离测量无盲区，特别在大气动力学研究、航空安全保障和风力发电等领域有着广泛的应用前景。国外对连续相干测风技术的研究较为深入，Windar Photonics、ZephIR、Galion 等公司均研制了相关产品[2]。据 ZephIR 公司 2014 年报道，ZephIR 300 型连续相干测风激光雷达与校准过的地基脉冲测风激光雷达进行了径向风速对比实验，在聚焦距离为 82 m 时，两设备测风结果相关系数达到了 0.997[3]。同年，ZephIR 300 与气象塔上风杯进行了风速对比实验，在时间分辨率为 0.5 s 时，选取风速在 7.5~20 m/s 范围内的数据，两系统所测风速的相关系数为 0.877[4]；丹麦科技大学 Q. Hu 等研制的连续相干激光雷达与声波风速仪进行了 50 min 对比实验，受限于光纤激光器相位噪声造成的低风速区域信噪比较低的影响，选取风速在 2 m/s 以上的数据，在时间分辨率为 0.5 s 时，两系统所测风速的相关系数为 0.862 [5]。国内研究起步较晚，仍处在系统仿真优化和样机性能测试阶段，尚无成熟的连续相干激光雷达产品供应市场。西南技术物理研究所研制了全光纤连续激光测风雷达系统，并与测风塔上声波风速仪进行了对比实验，两组设备在时间分辨率为 5 s 时，风速测量精度(均方差)达到 0.3 m/s[6]；中国科学院光电技术研究所对凝视探测模式的连续相干激光雷达光学天线进行了设计和仿真[7]。

文中选取人眼安全的 1.55 μm 为工作波段，研制了一台全光纤结构连续相干激光风速仪，将其安装于中国科学技术大学教学行政楼进行长期风速测量和性能分析，之后与一台校准过的脉冲相干测风激光雷达进行了对比实验。

1 基本原理

1.1 测风原理

大气中存在大量随大气运动的气溶胶粒子，激光经过望远镜发射到大气中，遇到气溶胶粒子发生散射，部分散射信号会原路返回被雷达接收。由于气溶胶粒子的运动，其后向散射信号在频域内会产生一个多普勒频移，假设气溶胶粒子的运动速度在望远镜径向方向上的投影速度为 v_{los}，则产生的多普勒频移 $f_{Doppler}$ 为：

$$f_{Doppler}=2v_{los}/\lambda \tag{1}$$

式中：λ 为发射激光的中心波长。公式(1)在气溶胶粒子的投影速度的方向与激光的发射方向相同时结果为负，反之为正。通过检测该多普勒频移信号可反演气溶胶在激光出射方向上的移动速度，即径向风速。通过对空间中至少三个方向的径向风速矢量合成，可以获得大气风场在一定空间区域内的平均风速。

1.2 连续激光空间权重

连续激光雷达发射激光为一个高斯光束，从望远镜内光纤端面发出后经过透射式非球面镜聚焦，在望远镜外形成另一段高斯光束，该光束穿过空间路径上的所有点风速对径向风速的合成都有影响，可以表示为[8]：

$$v_{los}(F)=\int_0^{+\infty} v_{los}(R)W(F,R)\mathrm{d}R \tag{2}$$

式中：$v_{los}(F)$为合成径向风速；$v_{los}(R)$为距离望远镜为 R 处位置的径向风速；$W(F,R)$为空间权重函数，F 为测量激光束的聚焦距离，在不考虑空间湍流影响的情况下，$W(F,R)$一般取洛伦兹函数，即探测距离大于 0 时，空间权重函数表示为：

$$W(F,R)=\frac{K}{R^2+(1-R/F)^2R_{Rayleigh}^2} \tag{3}$$

式中：$R_{Rayleigh}$ 为瑞利长度；K 为归一化常数，当激光器光束质量较高时，瑞利长度可近似表示为：

$$R_{Rayleigh}=\frac{\lambda F}{2\pi a^2} \tag{4}$$

式中：a 为高斯光束的束腰半径。由于空间权重函数

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的过滤性能，距离焦点越远，风速权重越低，对径向风速合成影响越小，高斯光束在束腰两侧的瑞利长度内光束近似平行，空间权重高。连续相干测风激光雷达所接收回波信号主要来自于该区域范围，即探测长度(probe length)[9-10]。

2 系统设计

2.1 结构设计

连续相干激光风速仪的系统结构如图 1 所示，由全光纤连续激光器、光纤放大器、望远镜、衰减器、保偏光纤耦合/分束器、环形器、平衡探测器、A/D 采集卡和工控机等组成。

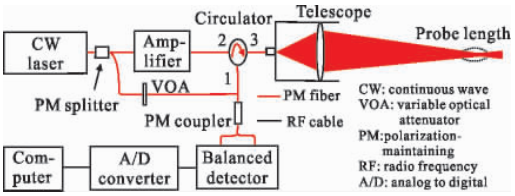


图 1 连续激光风速仪结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the continuous wave laser anemometer

该系统光源选用人眼安全的 1 550 nm 作为工作波段，连续激光器输出的激光经过保偏分束器分成两部分，其中的小部分经过可调衰减器后作为本振光输入到保偏耦合/分束器；大部分光经过光纤放大器进行功率放大，该激光由 1 端进入光纤环行器，由 2 端输出，经过同轴透射式望远镜扩束后发射到大气中。后向散射信号经过望远镜耦合进入光纤，由 2 端进入光纤环行器然后由 3 端输出。光纤环行器 3 端输出气溶胶后向散射信号进入保偏光纤耦合/分束器与本振光相干，相干后的光信号经过分束后进入平衡探测器转换为电信号，通过 A/D 采集卡将该射频模拟量信号转换为数字量信号，通过 A/D 采集卡上板载现场可编程门阵列 (FPGA) 对数字信号进行快速傅里叶变换，计算气溶胶移动的多普勒频移，进而计算出望远镜径向方向上的风速大小。当前连续激光风速仪主要应用在风力发电领域，而风场选址和风机安装过程中已经考虑了当地的长期风向，出现 180°风向偏差可能性很小，故文中系统没有安装移频设备以提高仪器的轻小型化和性价比。

散粒噪声极限条件下连续波相干激光雷达系统的信噪比 R_{SN}(忽略折射率湍流的影响)可表示为[11]：

$$R_{SN}=\frac{\pi R_d \eta_R P_T \Gamma(f)}{q_e f_{bin}} \tag{5}$$

式中：R_d 为探测器响应度；η_R 为接收机效率；P_T 为激光器发射功率；q_e 为电子电荷量；f_{bin} 为频率最小分辨率；$\Gamma(f)$ 为探测距离内气溶胶反射系数函数，可表示为 f 测量激光频率的函数：

$$\Gamma(f)=\beta\lambda^2\frac{f_{bin}}{2\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp(-2\alpha F+\frac{\lambda^2(f-f_{Doppler})}{8\sigma^2}) \tag{6}$$

式中：α 和 β 分别为 1 550 nm 波段下海拔 1 km 以内的大气扩张系数和后向散射系数；σ 为所设计系统的最小风速分辨率，取 σ=0.15 m/s。在多普勒信号频谱中心频率处，系统信噪比为−7.143 dB，满足风速测量对信噪比的要求。系统结构设计关键参数见表 1。

表 1 连续激光风速仪系统关键参数

Tab.1 Key parameters of CW anemometer

Item	Parameters	Value
Laser	Wavelength/nm	1 549
	Linewidth	7 kHz@1 549 nm
	Output power/W	1
Telescope	Effective aperture/mm	70
	Waist radius of Guassian beam/cm	1.7
	Focus distance/m	80
Balanced detector	3 dB bandwidth/MHz	250
	Responsitivity/A·W^{-1}	0.95
A/D converter	Sampling rate/MHz	250
	Sampling precision/bit	14

由于衍射原因，连续激光超过一定距离将无法聚焦，测量距离一般在几十至数百米[12]。根据连续激光的空间权重分布，以表 1 中的参数为例，不同聚焦距离对应的归一化权重函数及探测长度如图 2 所示，权重函数上方的短横线即为探测长度。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

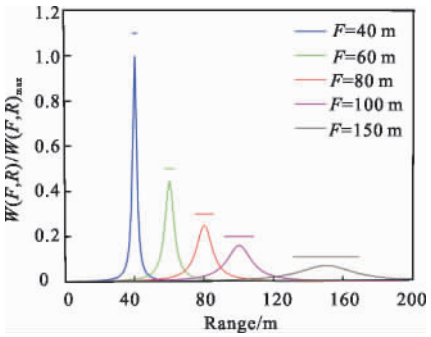


图 2 不同聚焦距离下归一化的权重函数及对应探测长度

Fig.2 Normalized weight function and corresponding probe length under different focusing distances

在不考虑气溶胶均匀性的情况下，径向风速反演主要受到探测长度内风速变化的影响，探测长度过长将导致径向大气回波信号可能包含多个速度分量，系统抗湍流能力降低，风场反演难度增大[13-14]。由图 2 可知，随着聚焦距离的增大，探测长度增大，径向测风的空间分辨率降低。根据飞机尾流监测、风力发电机纠偏控制等实际应用需求，系统设计测量光束聚焦于望远镜前方 80 m 处，对应探测长度约为 10.93 m。根据参考文献[14,15]中报道，ZephIR 300 型连续相干激光雷达在设定 100 m 聚焦距离时，探测长度约为 12.34 m，在径向风速测量中出现了回波信号包含多个速度分量的情况，但文献中并未给出相应的信号处理方法。为此所涉及的系统将利用求解频谱质心的方法来估计径向风速。

2.2 信号处理

由于连续相干测量中，激光器持续发射测量激光光束，风速仪也将持续接收到大气回波信号。连续聚焦激光在焦点处空间权重最高，因此只需将风速仪接收到的连续信号分段做快速傅里叶变换(FFT)，之后对多段频谱做非相干累加即可提取出焦点处的风速。考虑到径向探测长度内的大气回波信号可能包含多个速度分量的情况，利用公式(7)求解回波信号频谱质心代表径向风速[16]。

$$f_{sc}=\frac{\sum_{f_i=f_1}^{f_2} f_i S(f_i)}{\sum_{f_i=f_1}^{f_2} S(f_i)} \tag{7}$$

式中：f_{sc} 为频谱峰值；f_1 和 f_2 为给定带宽的上下限频率；$S(f_i)$为频率为 f_1 时的信号能量。

系统启动后，激光器、平衡探测器和 A/D 采集卡即上电工作，利用 250 MHz 的 A/D 采集卡连续采集数据。为了保证风速仪测风过程的实时性，系统采用 A/D 采集卡上板载现场可编程门阵列 (FPGA)芯片处理接收到的外差电信号，对每 1 024 点数据进行 FFT 计算获得多普勒频率，FPGA 型号为 Xilinx 公司生产的 XC7K70T。经过 100 000 次非相干累积后，由公式(1)估计径向风速。信号处理流程如图 3 所示。

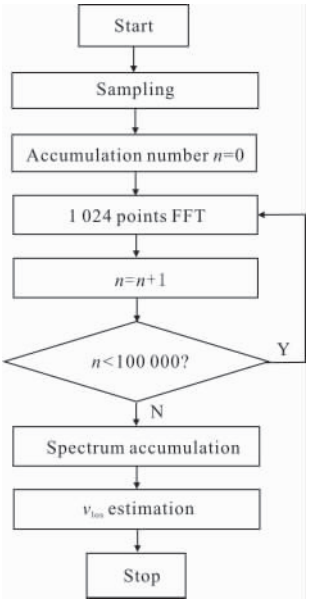


图 3 信号处理流程图

Fig.3 Flowchart of signal processing

采样频率为 f_{AD} 的采集卡对 n 次非相干累积数据的采样时间 T_s 为：

$$T_s=\frac{nP}{f_{AD}} \tag{8}$$

式中：P 为 FFT 长度。文中所设置的风速仪参数下，为 0.41 s。由于 FPGA 的使用，信号运算速度和数据传输速度加快，这将会大大提高系统的时间分辨率。

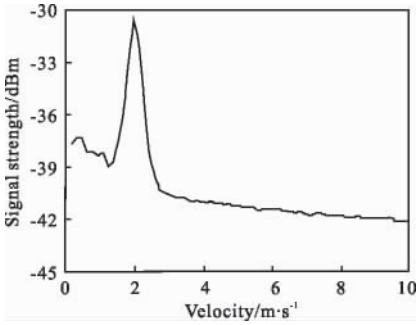
3 实验测试

3.1 径向测量

2019 年 1 月 5 日-2019 年 1 月 18 日，所设计连续激光风速仪安装于安徽合肥中国科学技术大学教学行政楼 16 楼激光雷达实验室(31.84N，117.27E)，对水平径向风速做了持续观测，风速仪输出数据更

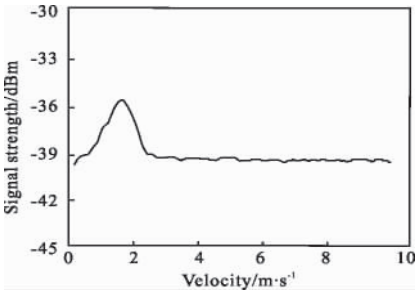
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

新速度为 1 s。在观测周期内包含了晴、阴、多云、小雨以及雾霾天气，测量结果均能明显检测到大气回波的多普勒频移信号。如图 4 所示。



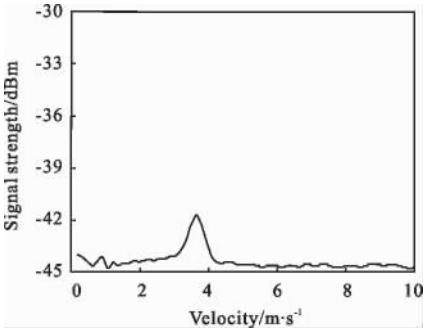
(a) 2019 年 1 月 7 日，17:41:26，小雨

(a) 7th Jan, 2019, 17:41:26, light rain



(b) 2019 年 1 月 10，10:05:12，阴有雾霾

(b) 10th Jan, 2019, 10:05:12, cloudy and smog



(c) 2019 年 1 月 18 日，13:24:38，晴

(c) 18th Jan, 2019, 13:24:38, clear day

图 4 回波信号频谱

Fig.4 Spectrums of backscattered signals

从图 4 可见，由于空中的颗粒物、雨滴体积较大，激光后向散射强烈。小雨天气下，雨滴体积大，激光后向散射强烈，风速仪输出多普勒信号峰值强度约为 13 dBm；雾霾天气下，大气中悬浮颗粒物浓度较大，风速仪输出多普勒信号强度约为 5 dBm；空气质量较好的晴天状态下，大气中气溶胶浓度较低，所设计风速仪仍能稳定测出大气回波的多普勒频移信号，强度约为 3 dBm，具有较高辨识度。

由于光纤环形器 1 端口与 3 端口之间存在串扰，激光器相位噪声不可避免地被引入 2×2 光纤，与本振光相干后，造成系统低频区域噪声幅值呈快速波动状态。实验中观察到，当该噪声强度高于大气回波信号强度时会造成多普勒信号难以区分甚至被覆盖的情况。为此，对所设计风速仪的噪声频谱进行了测量。

遮住望远镜，测量系统噪声，测得低频噪声幅值最大时频谱如图 5 所示。晴天条件下，大气回波信号弱，在低频区域更容易受到噪声干扰。长期径向测量结果可知，晴天下的风速仪接收的大气回波信号强度约为 3 dBm。在文中系统噪声频谱中，3 dBm 噪声强度对应频率 f_b 为 1.18 MHz，即大气回波信号频率低于 1.18 MHz 时(对应风速小于 0.915 m/s 时)，出现噪声强度大于信号强度的情况。针对机场、风电场等实际应用场合，出现风速小于 0.915 m/s 的可能性较小，所设计风速仪具有较强的可用性。

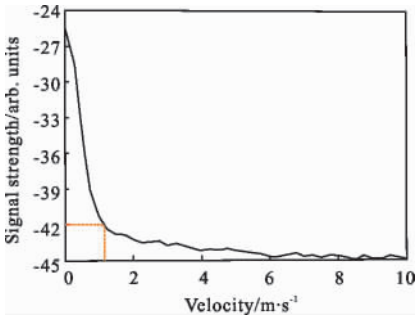


图 5 连续激光风速仪噪声频谱

Fig.5 Noise spectrum of the CW anemometer

3.2 对比实验

2019 年 1 月 18 日，天气状况为晴，气温 2~11 ℃。将所研制连续相干激光风速仪安装于安徽合肥中国科学技术大学教学行政楼 16 楼激光雷达实验室(31.84N，117.27E)，在同一时间段的相同位置平行安装了一台脉冲相干测风激光雷达进行测量结果比对。该脉冲相干测风激光雷达曾与深圳市气象局气象观测梯度塔上超声波风速仪测风数据进行了对比，与超声波风速仪所测风速数据相关系数为 0.980，标准差为 0.235 m/s，时间分辨率为 1 s。该脉

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

冲测风激光雷达的系统主要参数如表 2 所示。

表 2 脉冲相干激光雷达系统关键参数

Tab.2 Key parameters of plused coherent lidar

Item	Parameters	Value
Laser	Wavelength/nm	1 547
	Line width	4 kHz@1 547 nm
	Pulse energy/μJ	150
	Pulse width/ns	200
	Pulse repetitionfrequency/kHz	10
Telescope	Effective aperture/mm	70
Balanced	3 dB bandwidth/MHz	250
Detector	Responsitivity/A·W^{-1}	0.95
A/D	Sampling rate/MHz	250
Converter	Sampling precision/bit	14

连续激光风速仪与脉冲相干测风激光雷达望远镜径向平行安装,如图 6 所示。对比实验从上午 11:30:00 开始,持续时间超过 1 h,选取脉冲相干测风激光雷达 60~90 m 距离门内平均风速数据和连续激光风速仪数据进行比对。由于连续相干风速仪没有安装移频设备来区分风向,故实验中,两设备使用风速的绝对值进行比较,结果如图 7 所示。

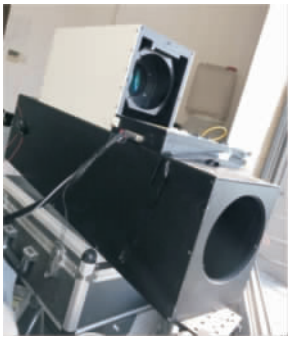
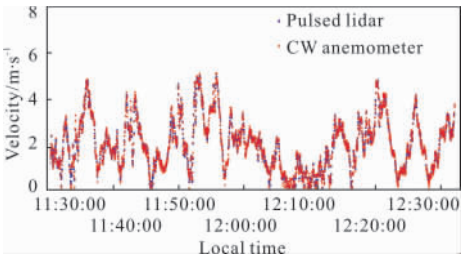


图 6 连续激光风速仪与脉冲相干测风激光雷达

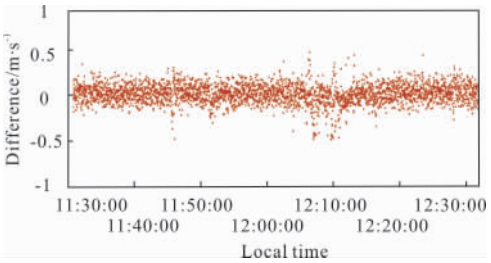
Fig.6 CW laser anemometer and plused coherent wind lidar

两系统测得数据的相关系数为 0.997, 标准差 0.090 m/s,一致性较好。风速最大相差出现在 11:51:36,为 0.480 m/s。在 12:05:28~12:11:54 时间段内,风速较低且波动剧烈,两系统测风数据一致性有所降低。实验开展地点位于市区内,在白天测量过程中,湍流、阵风、风切变等不规则大气运动剧烈,连续激光风速仪接收的不规则大气运动的多普勒信号形变较大,信号处理难度大。后续仍需对风速反演算法进行深入研究以提高风速仪在非层流风天气下的测量精度。



(a) 风速

(a) Velocity



(b) 差值

(b) Difference

图 7 连续激光风速仪和脉冲相干激光雷达测风对比

Fig.7 Wind velocity measured by the CW laser anemometer compared with data from the plused lidar

4 结 论

研制了连续相干激光风速仪,实现了 80 m 范围的风速探测。望远镜有效口径 70 mm, 为同轴透射式结构,系统采用全光纤结构,集成度高,便于工程化应用。将所研制激光风速仪安装于中国科学技术大学教学行政楼进行长期径向风速测量,实验过程中小雨、雾霾和晴天状况下, 测得大气多普勒频移信号峰值强度分别约为 13、5、3 dBm,系统时间分辨率为 1 s,风速测量范围下限约为 0.915 m/s。将所研制激光风速仪与一台校准过的脉冲相干测风激光雷达进行对比实验, 两设备测得风速数据相关系数为 0.997, 标准差为 0.090 m/s,最大相差为 0.480 m/s,表明所研制激光风速仪精度高,可用性强。下一步工作将确定风速仪的扫描方式,完成三维风场的精确实时探测。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] Jia Xiaodong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, et al. Optimal design of the telescope in coherent lidar and detection performance analysis [J]. ***Atca Optica Sinica***, 2015, 35(3): 0301001. (in Chinese)
贾晓东, 孙东松, 舒志峰, 等. 相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0301001.

[2] Rodrigo P J, Iversen T, Hu Q, et al. Diode laser lidar wind velocity sensor using a liquid-crystal retarder for non-mechanical beam-steering[J]. ***Optics Express***, 2004, 22(22): 26674-26679.

[3] Pitter M, Burin des Roziers E, Medley J, et al. Performance stability of zephIR in high motion environments: floating and turbine mounted [C]//EWEA Annual Event, 2014, PO.ID: 091.

[4] Barker W, Harris M, Pitter M, et al. Lidar turbulence measurements for wind turbine selection studies: design turbulence[C]//EWEA Annual Event, 2014, PO.ID: 169.

[5] Hu Q, Rodrigo P J, Pedersen C. Remote wind sensing with a CW diode laser lidar beyond the coherence regime [J]. ***Optics Letters***, 2014, 39(16): 4875-4878.

[6] Feng Litian, Guo Hongqi, Chen Yong, et al. Experiment of all fiber Doppler lidar at 1.55 μm [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(5): 844-847. (in Chinese)
冯力天, 郭弘其, 陈涌, 等. 1.55 μm 全光纤多普勒测风激光雷达系统与试验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 844-847.

[7] Peng Zhangxian, Liu Bo, Yue Yongjian. Optical system design of monostatic nonscanning Doppler wind lidar [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2015, 27 (9): 091010. (in Chinese)
彭章贤, 刘博, 岳永坚. 非扫描测风激光雷达光学系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 091010.

[8] Frehlich R, Kavaya M. Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence [J]. ***Applied Optics***, 1991, 30(36): 5325-5352.

[9] Brinkmeyer E, Waterholter T. Continuous wave synthetic low-coherence wind sensing Lidar: motionless measurement system with subsequent numerical range scanning [J]. ***Optics Express***, 2013, 21(2): 1872-1897.

[10] Hill C. Coherent focused lidars for Doppler sensing of aerosols and wind[J]. ***Remote Sens***, 2018, 10(3): 466.

[11] Hansen R S, Pedersen C. All semiconductor laser Doppler anemometer at1.55μm [J]. ***Optics Express***, 2008, 16(22): 18288-18295.

[12] Rodrigo P J, Pedersen C. Field performance of an all-semiconductor laser coherent Doppler lidar[J]. ***Optics Letters***, 2012, 37(12): 2277-2279.

[13] Wagner R, Mikkelsen T, Courtney M, et al. Investigation of turbulence measurements with a lidar [C]//EWEA Annual Event, 2009, PO.ID: 84.

[14] Harris M, Hand M, Wright A. Lidar for turbine control[R]. USA: National Renewable Energy Laboratory Technical Report, 2006: TP500-39154.

[15] Simley E, Pao L Y, Frehlich R, et al. Analysis of light detection and ranging wind speed measurements for wind turbine control[J]. ***Wind Energy***, 2014, 17(3): 413-433.

[16] Wendy F F, Moises R L, Oleg S, et al. Combined application of power spectrum centroid and support vector machines for measurement improvement in Optical Scanning Systems[J]. ***Signal Processing***, 2014, 98(5): 37-51.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net