

激光横风测量技术的研究

高雪荣, 赵培娥, 赵才曲, 李慧珺, 董吉辉^{**}, 罗杰平, 李策, 周鼎富^{*}

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 基于激光在湍流大气中的光强闪烁现象搭建了一套横风测量系统, 并提出了一种趋势匹配算法。对拟合后激光回波信号的趋势序列进行匹配, 计算两束回波信号的相关时间时延, 并反演出整条路径上的合成风速。用该系统与标准测风雷达分别对 117、225、485 m 的目标路径进行同步测量, 实验结果表明, 两台设备的测量数据具有较好的一致性, 相关系数分别为 0.8567、0.8327、0.7647。此外, 该系统采用收发一体化配置方式, 具有结构紧凑、质量轻、体积小、便于携带、算法简单、测量精度高的优点。

关键词 遥感; 激光雷达; 大气湍流; 激光测风; 横风; 趋势匹配

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0328002

Research on Laser Crosswind Measurement Technology

Gao Xuerong, Zhao Peie, Zhao Caiqu, Li Huijun, Dong Jihui^{**}, Luo Jieping,

Li Ce, Zhou Dingfu^{*}

Norla Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract Based on the phenomenon of laser light intensity scintillation in the turbulent atmosphere, this paper builds a crosswind measurement system, proposes a maximum trend matching algorithm to match the trend sequence of the fitted laser echo signal, calculates the time delay of two echo signals, and deduces the synthetic wind speed on the entire path. The system and the standard wind measurement radar are used to simultaneously measure the target path of 117, 225, and 485 m respectively. The experimental results show that the correlation coefficients of the measurement data of two devices are 0.8567, 0.8327 and 0.7647, which are in good agreement. In addition, the system adopts a transceiver integrated configuration, compact structure, light weight, small volume, easy to carry, simple algorithm, and high measurement accuracy.

Key words remote sensing; lidar; atmospheric turbulence; laser wind measurement; crosswind; trend matching

1 引言

横风也被称为侧风, 指垂直于物体运动方向的风矢量分量。横风会对人类的生产生活产生严重影响, 如高速行驶的汽车受到横风作用时, 行驶方向容易发生突变, 出现侧滑、侧翻; 过长的桥梁在横风长年累月的作用下, 容易出现坍塌。在军事上, 横风会引起直瞄式武器系统弹道偏移, 导致其射击精度下

降。因此, 实现横风的精准测量具有重要意义。利用激光优良的指向性和激光与大气粒子的相互作用, 可实现任意指向路径上横风信息的高精度遥测, 具有传统测风传感器如风杯、超声测风仪无法实现的长路径横风高分辨率遥测能力。

已有的激光横风测量方法有多波束多普勒测量方法^[1-4]、双光束交叉探测方法^[5-8]、多波束位移相关探测方法^[9-13]、激光闪烁法^[14-23]等。多波束多普勒测量方

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2021-06-07; 录用日期: 2021-06-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01014100)、四川省科技计划(2018TZDZX0006)

通信作者: *df_xh_zhou@sina.com; **j.h.dong@163.com

法利用激光对大气微粒后向散射的多普勒效应实现视线方向径向风的测量,通过一定夹角的多个径向风矢量反演出横风信息。该方法适用于测量开阔地势的横风,在山区、森林、城市等复杂地理环境下的测量会受到很大限制,且光波束夹角与测量精度之间的矛盾难以调和。双光束交叉探测方法利用两束相交的平行光形成干涉条纹,当气溶胶粒子横向穿过条纹区时会产生强度变化的散射光信号,对该散射光信号进行频谱分析就能得到气溶胶粒子横穿激光聚焦区的横向移动速度(横风速度)。但该方法只能实现双光束相交小范围内的横风测量,难以实现较长路径上的横风测量。多波束位移相关探测方法将多个光束在空间上相距一定距离平行发射,一定尺度的气溶胶团穿过多光束时分别引起激光回波信号在时间、强度、空间上的不均匀分布,进而通过相关统计分析得到垂直于光束方向的风向与风速等参数。该方法虽然原理简单,易于实现,但需要多个发射光源,对激光器的能量要求较高,系统体积、质量较大;且作用距离小,测量精度受限于周边环境。激光闪烁法基于光束传播过程中光强和相位受湍流影响发生变化的原理,通过探测受湍流调制的目标反射信号,实现对路径上横风信息的遥测。该方法的测量原理简单,对器件要求低、成本低,得到了人们的广泛研究。基于激光闪烁法的横风测量方法有两种:第一种方法是双端收发

配置^[14-17],即利用两个相邻探测器接收待测路径上的同一束透射激光束,假定湍流的频谱不随时间变化,通过计算两相邻探测器之间的时空相关性推导路径上的横风;第二种方法是单端收发配置^[18-21],即利用激光器和两个相邻探测器分别照射和接收某个目标的反射光,基于大气湍流引起的目标(如山坡、森林、建筑物)反射光强度波动的空间和时间相关性实现目标路径上的横风遥感。

国内关于激光测量横风的研究较少,更多停留在理论与数值模拟^[22-23]阶段,实验研究也多采用激光闪烁法完成。田勇志等^[24]利用光学闪烁仪在 330 m 距离处进行风速反演实验,相比风速计的测量结果,光学闪烁仪能准确可靠地获取区域横向风速。但该仪器的收发端配置方式装调复杂,在有些应用场合无法实现,而被动式仪器依赖于自然光的照明条件,适用环境受限。为了克服上述探测方式的不足,本文基于激光闪烁法的探测原理,结合多波束位移相关法探测形式,搭建了一套收发一体化的横风激光测量系统,并开发了一种最大趋势匹配算法,实现了任意指定长程路径上的横风测量。

2 激光测风系统

2.1 测风系统探测的原理

实验搭建的激光横风探测系统原理如图 1 所

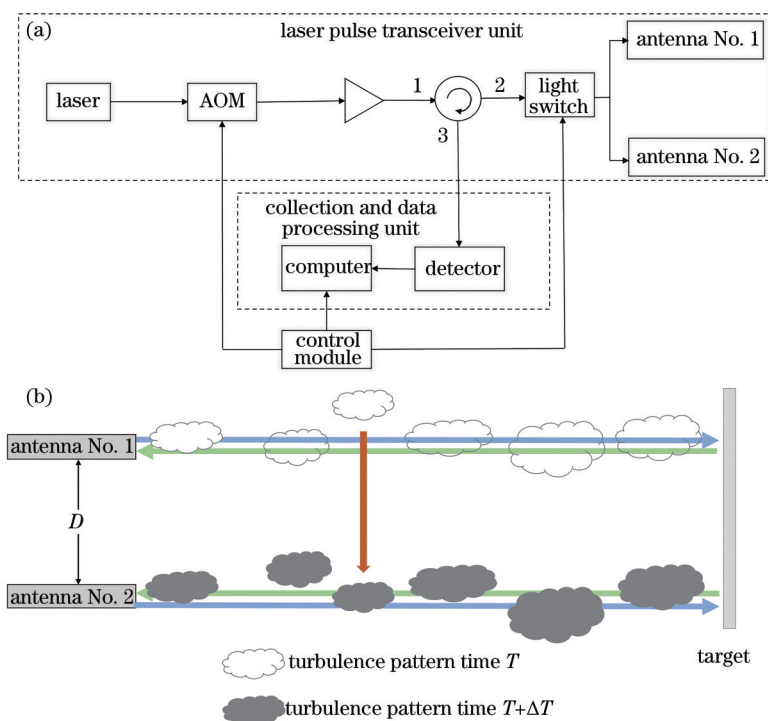


图 1 激光横风测量的原理。(a)系统组成;(b)探测原理

Fig. 1 Principle of the laser crosswind measurement. (a) System composition; (b) detection principle

示,该系统主要由激光脉冲收发单元、采集及信息处理单元和综合控制模块等组成。两个收发一体化的光学天线面向目标平行放置,激光经声光调制器(AOM)调制为脉冲信号,放大后传入环形器的端口1,经端口2从某一天线发出,被目标反射后由同一天线接收并经环形器的端口3导入光电探测器,然后传入采集及信号处理模块实现数据的保存及后续处理。综合控制模块通过光开关实现两光学天线交替收发激光,使激光脉冲的重复频率与采集卡采集信号的触发频率一致。通过采集及信号处理模块采集的回波信号序列奇偶性将回波信号与两光学天线一一对应。激光从天线发出到接收的过程中,目标反射会改变激光的光强,激光经过湍流时光强会发生闪烁。此外,将两束光的光强起伏差异均归功于大气湍流。激光穿过湍流团向目标发射时会对两束回波信号在不同时间(T)内产生相同的调制,即两回波信号的光强起伏相同,因此,通过分析两束激光光强产生的起伏趋势时间延迟(ΔT),利用两天线之间固定的距离(D)计算出横向风速。

2.2 测风反演算法

常用的横风风速计算方法有峰值法、斜率法、频率法、D. Briggs法、协方差法,使用最广泛的方法是峰值法和斜率法,但这两种方法都存在不足。如峰值法的测量结果受测量路径中风力的干扰会出现严重波动;斜率法中风速与斜率间相关系数的确定比较复杂。大多数研究表明,折射率结构常数的变化不会影响风速反演的精度^[25],但文献[24]中的实验结果显示,风速反演精度受折射率结构常数变化的影响。

实验基于激光光束强度波动的时域分析实现对风速的测量,对回波数据拟合后匹配趋势子序列,从而计算时间延迟和横风风速。光的波动方程可表示为

$$E = E_0 \exp(i\varphi_0 - i\omega t), \quad (1)$$

式中, φ_0 为初始相位, ω 为角频率, E_0 为振幅, i 为虚数单位, $i^2 = -1$ 。激光到达目标后反射的回波信号 B 可表示为

$$B = \gamma G(t, z) E_0 \exp[-i(kz - \varphi_0 + \Delta\varphi) - i\omega t], \quad (2)$$

式中, z 为目标与发射点之间的距离, γ 为目标处的反射系数, k 为波矢, $\Delta\varphi$ 为光相位的变化量, $G(t, z)$ 为湍流对激光的影响函数, t 为时间。湍流对激光的影响是复杂多变的,宏观上主要体现在不同距离、

时间的湍流特性不一, $G(t, z)$ 主要与时间 t 、距离 z 有关。探测器接收的光信号光强可表示为

$$I = B \cdot B^* = \gamma^2 G(t, z)^2 E_0^2, \quad (3)$$

式中, B^* 为 B 的厄米共轭。根据泰勒湍流冻结理论,即湍流的平均流动速度相对湍流的瞬时速度很大时,湍流仿佛被冻结以其平均流动速度进行平移。这种情况下可将空间固定点测得的物理量随时间的变化等同于在同一时刻所测空间分布的变化,即同一时刻,距离从0增加到 L (L 为发射面到目标的距离)时的湍流特性不变,湍流影响函数 G 只与时间有关。探测器接收回波信号的光强可表示为与时间相关的函数,即

$$I = I(t) = \gamma^2 G(t, L)^2 E_0^2. \quad (4)$$

记两个天线的回波信号分别为 I_1 、 I_2 ,对降噪后的 I_1 、 I_2 分别进行多项式拟合,关于时间变化的光强数据组(t_i, I_i)可用 n 阶多项式表示为

$$f(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n = \sum_{k=0}^n a_k t^k. \quad (5)$$

求解各系数 $a_k, 1 \leq k \leq n$ 得到拟合方程,定义拟合后的光强信号(I_1, I_2)趋势函数为

$$f(i) = \begin{cases} 0, & I(i) \leq I(i+1) \\ 1, & I(i) > I(i+1) \end{cases}, \quad (6)$$

式中, i 为脉冲时间。计算两天线回波信号趋势函数 $f_1(i)$ 、 $f_2(i)$ 的公共子序列,假设存在整数 i, j, h 使序列 $f_1(i-h+1) \dots f_1(i-1) = f_2(j-h+1) \dots f_2(j-1)$ 成立,就能计算得到时间延迟 $\tau = 2 \times (j-i) \times f_s$ 。其中, f_s 为实验中采集卡的触发频率,横风风速 $v = \frac{D}{\tau} = \frac{D}{2 \times (j-i) \times f_s}$ 。

3 实验验证

3.1 实验设置

实验在西南技术物理研究所1号楼与其东侧居民楼之间进行,实验平台在1号楼11层,距地面高度约30 m。根据成都常年南北风的特性,将实验平台坐西向东摆放,目标为实验平台东侧的居民楼外墙墙体,如图2所示。比对测风雷达安置在实验平台的下一楼层(层高约为3 m)同位置处,三个目标距实验装置的水平距离 L 分别为117、225、485 m。通过光学瞄准镜观测目标的具体位置,其光轴与测风系统的收发天线光轴平行。

用半导体激光器发射中心波长为660 nm、脉冲

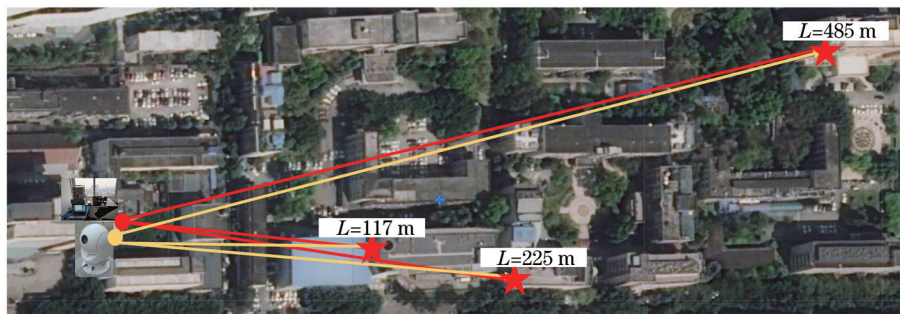


图 2 探测目标的位置

Fig. 2 Location of the detection target

宽度为 20 ns、发散角约为 0.1 mrad 的准直光束。两天线平行放置，光学孔径 ϕ 为 30 mm，距离为 0.1 m。通过综合控制模块的光开关实现两天线高频交替发射激光脉冲并接收经目标反射的回波信号。回波信号经环形器传入采集及信息处理模块（采集卡型号为 GageCSE123G2），采集卡的采集触发频率与激光器的脉冲发射重复频率相同。

激光测风雷达面向目标方向记录三维风速值，并反演出不同距离门的横风风速与风向。忽略距离门内的风速误差，对不同距离门的风速进行算术平均。该雷达以每两秒一次的速度进行反演，并用数据平均的方法获取与实验平台时间相匹配的数据。

3.2 实验处理方法

实验平台的数据处理流程如图 3 所示。先对原始数据进行降噪，然后根据采集卡接收的回波信号序列奇偶性将回波信号与两天线分别对应，单条脉冲的回波信号如图 4 所示。从多条脉冲回波信号中提取光强信息，得到激光光强随时间起伏的序列，如图 5 所示。分别对两天线发射激光回波信号的光强变化序列进行拟合，结果如图 6 所示。对拟合序列定义趋势函数，趋势函数序列如图 7 所示（为了便于观看，将 2 号天线的趋势函数序列整体上移了 2 个单位）。对两天线回波信号的趋势函数序列公共子序列进行匹配，计算湍流经过两天线之间的时

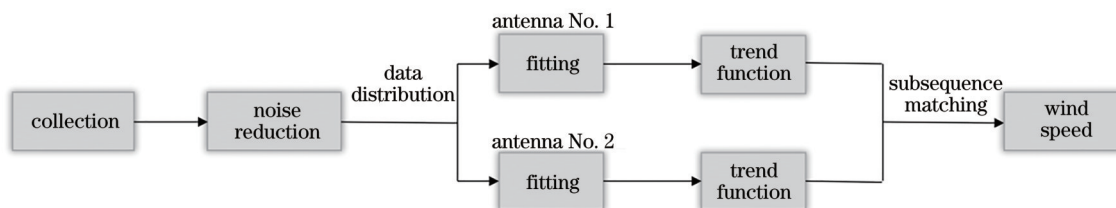


图 3 实验平台的数据处理流程图

Fig. 3 Data processing flow chart of the experimental platform

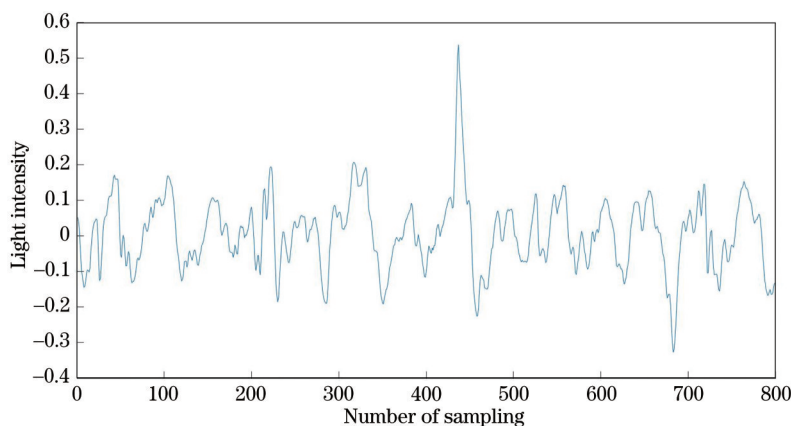


图 4 单条脉冲的回波信号

Fig. 4 Echo signal of single pulse

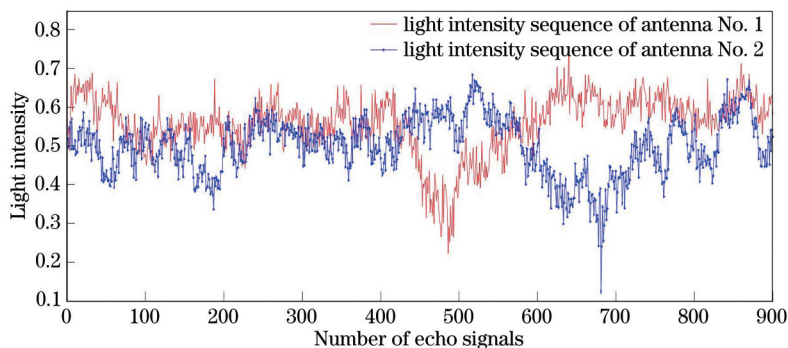


图 5 回波信号的光强

Fig. 5 Light intensity of the echo signal

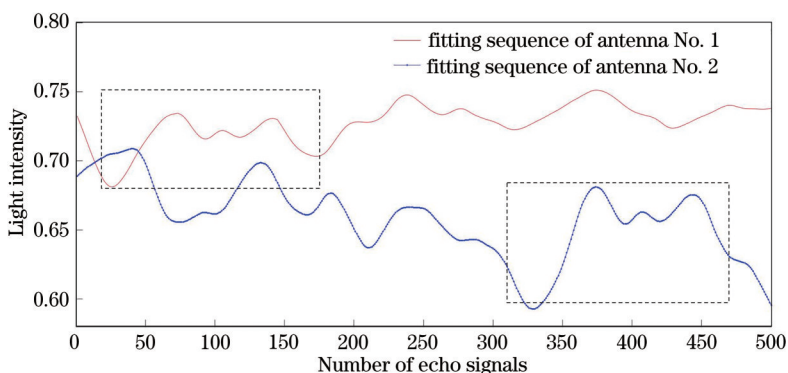


图 6 回波信号的拟合结果

Fig. 6 Fitting result of the echo signal

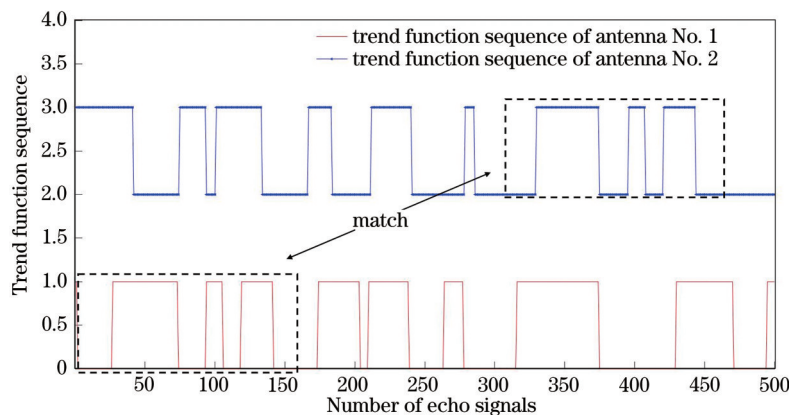


图 7 趋势函数的序列匹配

Fig. 7 Sequence matching of the trend function

间延迟,从而得到风速。

实验数据处理过程中光强序列长度、趋势匹配时的公共序列长度 l 、公共序列误码率均会影响实验结果的精度,因此在数据处理时需对上述参数进行控制。1)趋势匹配时,若风速较小,湍流团随风移动的速度缓慢,如果对整个光强序列直接进行匹配,会耗费较长时间。因此,对两光强序列进行分段,对两回波信号数据段分别进行匹配,从而有效提高处理

速度。同时,使用滑动分段的方法,即每一段数据向后滑动固定点数得到下一段数据,可以有效避免数据分段导致的信息丢失。2)为了避免公共序列匹配时引入误差,对公共序列的最小长度进行限定。取临界时间为 5 ms,则公共子序列的最短长度 l 为 25。3)湍流的随机性会导致回波信号的光强出现瞬时性变化,因此,在公共序列匹配时允许公共序列存在误码,即在公共序列中误码个数小于公共序列总长度

20% 或公共序列中出现误码的位置非连续时可忽略这些误码,认为二者的光强起伏依旧是相关的。

3.3 实验结果及分析

为了与激光测风雷达反演的风速数据进行对比分析,实验平台设置相同的采样时间,通过数据平均方式使两设备的测风数据时间一致。对不同

目标对应的数据分别进行分析,图 8、图 9 和图 10 分别为不同目标距离在 2021 年 3 月 5 日下午采集的数据。可以发现,实验平台在距离为 117、225、485 m 处三个目标的测量结果与标准激光测风雷达同时时间内的测量结果均具有较好的一致性。其中,风速方向几乎没有差异,但个别风速有较大差异,实验

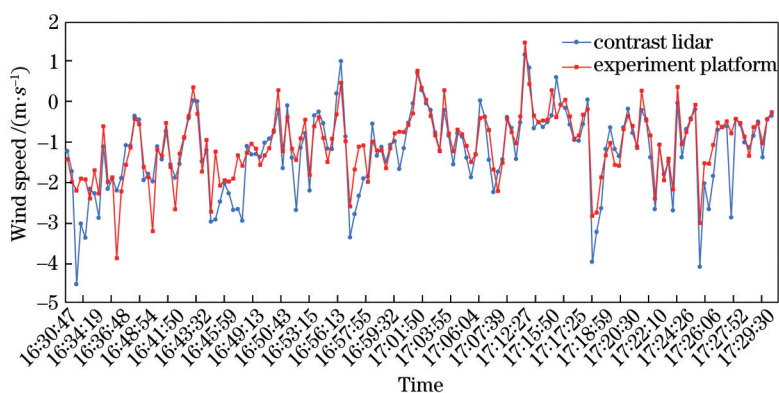


图 8 目标距离为 117 m 的测量结果

Fig. 8 Measurement result with a target distance of 117 m

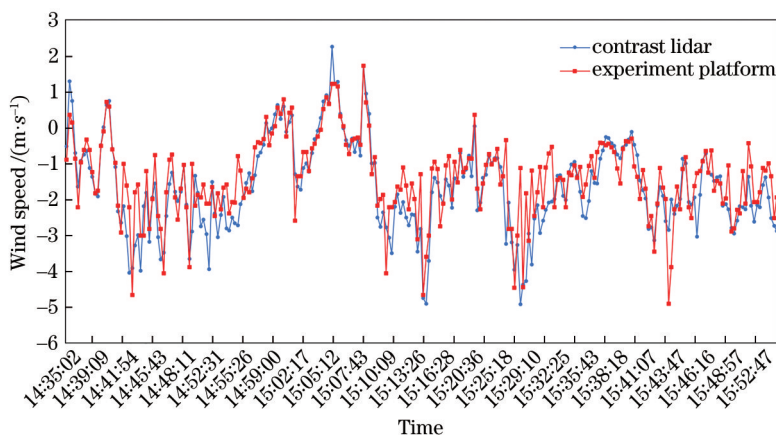


图 9 目标距离为 225 m 的测量结果

Fig. 9 Measurement result with the target distance of 225 m

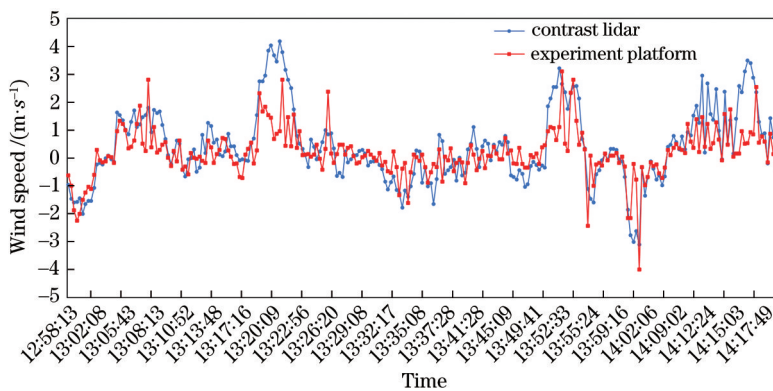


图 10 目标距离为 485 m 的测量结果

Fig. 10 Measurement result with a target distance of 485 m

平台测量的风速相较激光测风雷达的测量结果偏小,主要原因:1)对比激光测风雷达与实验平台安置在同一位置不同高度处,而测量过程中对比激光测风雷达设置了一定的仰角,使其实际扫描风道与实验平台探测风道存在夹角;2)对比激光测风雷达存在一定的探测盲区,对靠近装置盲区距离内的风速测量不够精准;3)实验点处于居民区,环境杂乱、周围建筑物、树木高度参差不齐,由环境造成的城市风明显,干扰较大。

表 1 为对三个不同距离目标的测量结果,可以发现,目标距离增大时,实验平台所得数据与对比激光雷达所测数据之间的相关性下降,即两实验设备所得数据的风速波动一致性随距离的增大有所降低;两种数据的差异标准差随距离的增大逐渐增大,且两种数据的拟合度也随之下降。即目标距离增大时,实验平台所得数据与对比激光雷达所得数据的风速数值差异逐渐增大。当距离增大时,实验平台反演的数据精准度也有所下降。这可能与激光能量和光学天线的焦距有关,实验平台使用的激光能量低,光学天线的焦距较短;且反演算法准确的前提是实验满足湍流冻结理论,风速过小会导致湍流冻结理论不成立,从而增大误差。

表 1 不同距离目标的测量结果

Table 1 Measurement results of different distance targets

Distance/m	Linearity	Difference/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Correlation/%
117	0.8339	0.5299	0.8567
225	0.7037	0.6887	0.8327
485	0.6937	0.8658	0.7647

4 结 论

采用双平行收发探测装置,将发射与接收装置设置在同一端,体积小且便于携带,同时能解决传统双端收发实验中近发射端探测夹角导致时间延迟趋近于 0 的问题。此外,设计了一种回波信号趋势匹配算法,避免了大量相关运算,有效提高了风速的反演速度。实验结果表明,除个别数据外,本算法根据实验平台采集数据的反演结果与同一时间标准激光测风雷达所测风速及方向基本一致,风速略小于标准激光雷达的测量结果,但在目标距离为 485 m 时该系统与测风雷达的测量结果依旧具有较好的一致性。如果增大激光能量和天线焦距,在环境开阔的地方能获得更高的探测精度,从而实

现横风测量仪器的小型化、便携化、智能化、多功能一体化。

参 考 文 献

- [1] Afanas'ev A L, Banakh V A, Gordeev E V, et al. Measurement of the cross wind velocity by the Doppler lidar and the correlation passive optical meter [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10466: 104662X.
- [2] Durst F, Howe B M, Richter G. Laser-Doppler measurement of crosswind velocity[J]. Applied Optics, 1982, 21(14): 2596-2607.
- [3] Song X Q, Wang F H, Yin J P, et al. Three-beam methodology and observations of wind profiling with Doppler lidar[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(4): 136-144.
宋小全,王芳涵,尹嘉萍,等.多普勒测风激光雷达三波束反演方法与实验[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(4):136-144.
- [4] Yuan L C, Liu H, Liu J Q, et al. Wind vector estimation of coherent doppler wind lidar based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0810004.
原禄城,刘恒,刘继桥,等.基于遗传算法的相干多普勒测风激光雷达风场反演方法[J].中国激光,2020,47(8):0810004.
- [5] Zhou X H, Zhou J H, Shu W. Measurement of the density field of narrow airflow by laser multi-beam interferometry[J]. Mechanics and Practice, 1995, 17(4): 60-62.
周兴华,周建和,舒玮.激光多光束干涉法测窄小气流密度场[J].力学与实践,1995,17(4):60-62.
- [6] Han W H, Lü J G, Wang Y M, et al. Image data processing of spaceborne Fabry-Perot interferometer prototype[J]. Chinese Journal of Space Science, 2011, 31(6): 784-788.
韩威华,吕建工,王咏梅,等.Fabry-Perot测风干涉仪数据处理[J].空间科学学报,2011,31(6):784-788.
- [7] Zhuang P, Shen F H, Wang B X, et al. Rayleigh-Mie wind lidar based on Fabry-Perot interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1210001.
庄鹏,沈法华,王邦新,等.基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利-米散射测风激光雷达研究[J].中国激光,2020,47(12):1210001.
- [8] Wang C, Zhang X Z, Jiang J F, et al. High-speed airflow measurement system based on optical fiber Fabry-Perot sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206005.
王超,张学智,江俊峰,等.基于光纤法布里-珀罗传

- 感的高速气流测量系统[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1206005.
- [9] Krieger J R. A multiple beam lidar for wind measurement[D]. Iowa: University of Iowa, 2001.
- [10] Huang T, Zhang J, Yang L H. Wind lidar based on the correlation method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 152-155.
黄滔, 张静, 杨丽寰. 基于相关法的测风激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 152-155.
- [11] Huang T. Correlation method wind measurement lidar design and simulation research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
黄滔. 相关法测风激光雷达设计及仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [12] Tan Y, Wu X Y, Ding Y, et al. Analysis and comparison of multiple beam lidars for wind measurement[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(29): 22-26.
谭莹, 吴夏颖, 丁颖, 等. 多光束测风激光雷达技术分析和比较[J]. 科技导报, 2011, 29(29): 22-26.
- [13] Cao S. Research on optical design and data processing of non-Doppler laser wind radar based on correlation method[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
曹爽. 基于相关法的非多普勒激光测风雷达光学设计与数据处理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- [14] Lawrence R S, Ochs G R, Clifford S F. Use of scintillations to measure average wind across a light beam[J]. Applied Optics, 1972, 11(2): 239-243.
- [15] Barakat R, Buder T E. Remote sensing of crosswind profiles using the correlation slope method[J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(11): 1604-1608.
- [16] Poggio L P, Furger M, Prévôt A H, et al. Scintillometer wind measurements over complex terrain[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(1): 17-26.
- [17] Wang T I, Ochs G R, Lawrence R S. Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations[J]. Applied Optics, 1981, 20(23): 4073-4081.
- [18] Porat O, Shapira J. Crosswind sensing from optical-turbulence-induced fluctuations measured by a video camera[J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5236-5244.
- [19] Engel A, Porat O, Shapira J, et al. Experimental evaluation of optical crosswind measurement systems[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9242: 92421K.
- [20] Shapira J, Porat O, Livneh M, et al. Atmospheric cross-wind and turbulence measurements using turbulence-induced scintillations[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7684: 76841L.
- [21] Maryfield T, Dadkhah M, Diego S, et al. Integrated wind laser rangefinder receiver: US0364272A[P]. 2018-12-20.
- [22] Huang R H. The idea of using laser scintillation to measure wind[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1977, 1(1): 44-49.
黄润恒. 利用激光闪烁测风的设想[J]. 大气科学, 1977, 1(1): 44-49.
- [23] Dong T, Wu Y, Hou Z H, et al. Inversion of vertical distribution of transverse wind speed by using beam jitter[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(5): 623-627.
董婷, 吴毅, 侯再红, 等. 利用光束抖动反演横向风速垂直分布的研究[J]. 量子电子学报, 2017, 34(5): 623-627.
- [24] Tian Y Z, Liu J G, Lu Y H, et al. Remote sensing of crosswind speed by a scintillometer in boundary layer[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(5): 333-337.
田勇志, 刘建国, 陆亦怀, 等. 应用大口径闪烁仪测量近地表横向风速的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(5): 333-337.
- [25] Banakh V A, Marakasov D A. Wind profile recovery from intensity fluctuations of a laser beam reflected in a turbulent atmosphere[J]. Quantum Electronics, 2008, 38(4): 404-408.