

引用格式: SUN Jia-qi, HU Miao, LI Peng, *et al.* Echo Signals Analysis of Side-scattering LiDAR under Different Wind Speed Conditions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0401002

孙佳琦, 胡淼, 李鹏, 等. 不同风速下侧向散射激光雷达的回波信号分析[J]. 光子学报, 2020, **49**(4):0401002

不同风速下侧向散射激光雷达的回波信号分析

孙佳琦¹, 胡淼^{1,2}, 李鹏^{2,3}, 贺文迪¹, 欧军¹, 周雪芳¹, 杨国伟¹, 卢旻¹, 毕美华¹

(1 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

(2 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

(3 防化研究院, 北京 102205)

摘要: 对不同风速条件下, CCD 侧向散射激光雷达的回波信号进行了分析. 根据 Mie 散射原理及侧向散射激光雷达工作原理, 确定了大气气溶胶浓度与激光雷达侧向散射光强的相关性; 进一步考虑气溶胶浓度与风速的关联, 利用实验装置获取了激光雷达侧向散射光强与风速的关系, 分析了不同风速条件下侧向散射激光雷达的回波信号. 在轴流风机以及自然风两种条件下进行对比实验发现, 当风速范围在 1~4.5 m/s 时, 侧向散射光强随风速的增加而增加; 当风速范围在 4.5~6.0 m/s 时, 光强随风速的增加较少. 对实验结果归一化处理, 得到风速范围在 1~4.5 m/s 时, 风速每增加 1 m/s, 侧向散射光强在轴流风机及自然风的实验条件下分别增加了 3.7% 和 3.9%; 风速范围在 4.5~6.0 m/s 时, 风速每增加 1 m/s, 侧向散射光强分别减少了 3.1% 和 3.8%, 在自然风况的各个风向上都基本符合这一变化趋势.

关键词: 电荷耦合器件; 侧向散射; 激光雷达; 风速; 气溶胶

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204904.0401002

Echo Signals Analysis of Side-scattering LiDAR under Different Wind Speed Conditions

SUN Jia-qi¹, HU Miao^{1,2}, LI Peng^{2,3}, HE Wen-di¹, OU Jun¹, ZHOU Xue-fang¹, YANG Guo-wei¹, LU Yang¹, BI Mei-hua¹

(1 College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(2 State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

(3 Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: The echo signals of the CCD side-scattering lidar under different wind speed conditions were analyzed. According to Mie scattering theory and CCD side-scattering LiDAR principle, the correlation between aerosol concentration and its side-scattering light intensity is determined. By considering the relationship between aerosol concentration and wind speed, the echo signals of side scatter lidar under different wind speed conditions are analyzed. By comparing the experiments under two conditions of axial fan wind and natural wind, it can be found that when the wind speed is in the range of 1~4.5 m/s, the aerosol concentration increases with the increasing of wind speed; otherwise when the wind speed is in the range of 4.5~6 m/s, the aerosol concentration decreases with the increasing of wind speed. Normalizing the results, conclusions are drawn that when the wind speed are in the range of 1~4.5 m/s, the side-scattering light intensity increase by 3.7% and 3.9% with the wind speeds increase by 1 m/s in the conditions of axial fan and natural wind. When the wind speeds are in the range of 4.5~6.0 m/s, the light

基金项目: 国家自然科学基金(No.61705055), 2020 年度浙江省重点研发计划项目(No.2019C01G1121168)

第一作者: 孙佳琦(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光雷达. Email: kelosun@163.com

导师(通讯作者): 胡淼(1982-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为固体激光器技术以及大功率 LED 技术等激光技术. Email: miao_hu@foxmail.com

收稿日期: 2019-12-19; 录用日期: 2020-02-14

<http://www.photon.ac.cn>

intensity decreased by 3.1% and 3.8% with wind speeds increases by 1 m/s in the two conditions, and the trend exists in all wind coming directions of natural wind.

Key words: Charge-coupled device; Side-scattering; LiDAR; Wind speed; Aerosol

OCIS Codes: 010.1290; 010.1310; 140.3410; 140.3530; 140.3600; 140.6810

0 引言

在气象观测中,地面风速和风向是最基本的观测要素之一.传统的观测方式是在铁架塔上利用风杯和风向标进行观测^[1],这种方式具有经济实用、精度可靠的优点,但并不能实现远距离遥测,而且基于风杯和风向标的机械测风仪在长时间工作后极易出现损坏、卡涩等现象^[2].作为风速测量领域的另一种方式,基于多普勒频移技术的激光雷达通过提取光散射回波信号的多普勒特征对风速进行测量,不仅克服了机械测风仪移动性差、部件易老化的缺点,还具备远距离遥测、环境适应性强和测量精度更高等优点,但由于造价昂贵,目前仍未得到广泛普及.

作为国际上大气探测的主要手段之一,基于 CCD 的激光雷达已经在气象因素对气溶胶^[3]影响的复杂问题领域具有广泛应用.姜忠等^[4]研究发现,气溶胶粒子数浓度谱呈现单峰结构,与气象要素有密切关系.曹念文等^[5]提出了基于 CCD 激光雷达探测气溶胶类型的方法,证明了在实际探测中 CCD 激光雷达能够区分不同的气溶胶类型.麻晓敏等^[6]提出了 CCD 侧向散射激光雷达的信号提取和处理方法,证明了 CCD 侧向散射激光雷达的应用有效性和准确性.胡森等^[7]提出的采用 CCD 侧向散射激光雷达实时监测 PM2.5 浓度的方法,证实了侧向散射光强与气溶胶浓度的准线性关系,为近地气溶胶参数的探测提供了有效手段.此外,在国际上学者们还通过实验证实了风速与气溶胶浓度存在的相关性.如 CHALOULAKOU A 和 VARDOULAKIS S 等^[8,9]在实验区域发现低风条件导致气溶胶浓度提高 $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,强风条件造成气溶胶浓度值减小.PUUSTINEN A 等^[10]提出了对风况分类后再分析的方法,在不同风向下进行风速与气溶胶浓度的相关性实验并得出了结论.上述文献为分析不同风速下侧向散射激光雷达的回波信号奠定了理论基础.本文通过对侧向散射激光雷达的回波信号光强与实时风速建立关系模型,以遥测风速变化.

1 实验装置和原理

作为气流运动的物理量,风除了有数值的大小(风速),还具有作为矢量的方向(风向)^[11].风速可以造成大气气溶胶的聚集、扩散和稀释^[12],风向则关系着气溶胶的移动方向,都是影响气溶胶浓度的关键要素.KAVOURAS I G 等^[13]结合风向对气溶胶浓度的影响,对风按照风向分类得到气溶胶浓度与风速关系为

$$Y = a + \sum_{i=1}^n (b_i X_i) \quad (1)$$

式中, $Y(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 表示气溶胶浓度, $a(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 表示无风时气溶胶浓度, $b_i(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 表示对风况按照风向分类后的回归系数, X_i 表示经分类后各个方向的风速.根据最小二乘线性(Ordinary Least Square, OLS)回归模型对式(1)进行最佳拟合系数分析,所有自变量的方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)均低于 $10^{[14]}$.因此在本实验中风向与激光出射方向须保持垂直,排除风向对实验结果的影响.

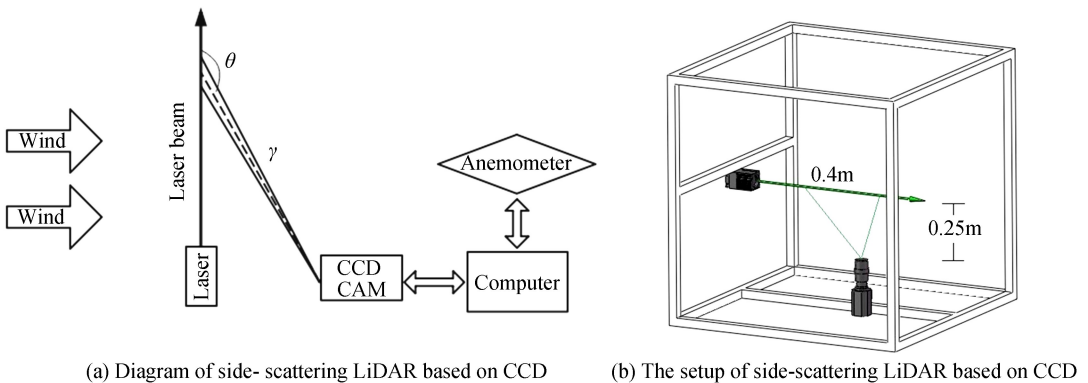


图1 CCD侧向散射激光雷达
Fig.1 Side-scattering LiDAR based on CCD

实验装置原理如图 1(a)所示,在 Clidar 系统^[15]上增加了风速测量装置,在获取侧向散射回波信号图的同时记录实验地点的实时风速,建立起侧向散射光强总值与实时风速的关系模型.本实验装置如图 1(b)所示,激光器波长为 532 nm,发射功率为 500 mW,并选用型号 Watec WAT-902H2,分辨率为 768×576 的 CCD.实验过程中激光束由水平方向出射,CCD 以夜空为背景自动采集回波信号图.由于本实验侧向散射激光雷达的实验效果优于前向与后向散射激光雷达,激光束与 CCD 法向保持垂直,CCD 与激光束的垂直距离为 0.25 m,CCD 采集到的激光束长度为 0.4 m.通过铝型材构件固定整个装置系统,保证各个模块相对位置不变.

实验选择在晴朗的夜晚,并假设在实验过程中气溶胶粒度谱不变.为了实时与风速测量仪的测量结果进行比较,Clidar 系统利用程序每隔 3 s 自动采集 1 帧回波信号图.实验中选用波长为 532 nm 的激光器,散射类型属于 Mie 散射^[16].根据 Mie 散射原理及侧向散射激光雷达理论,CCD 接收的侧向散射光强总值与气溶胶浓度呈线性关系^[17]

$$I_{\text{sca}}(\theta) = K \cdot W + C \quad (2)$$

式中, $I_{\text{sca}}(\theta)$ 表示 CCD 接收到角度为 θ 的光强总值, W 为气溶胶浓度, K 为比例系数, C 是常数.为了获取光强分布总值,对回波信号图进行灰度值提取^[18],对 256 个灰度值进行统计,计算每个灰度值对应的像素点数,将不同灰度值同其对应像素点数的乘积记为该灰度值的总体亮度 I_0, I_1, \dots, I_{255} ,将各个亮度相加,得到每幅图的光强总值为

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=0}^{255} I_i \quad (3)$$

根据式(2),气溶胶浓度由光强总值线性表示;根据式(3),通过数据处理单元对回波信号图进行灰度值提取可以得到光强总值.在本实验中建立光强总值与风速的关系模型并进行分析,即实现了对气溶胶浓度与风速关系的探究.

2 实验结果及分析

为排除不同来风方向气溶胶浓度本底差异对测量结果的影响,实验过程中应保证激光束与风向角度不变;选择激光束与风向相互垂直,以减少实验过程中实验装置对来风的阻挡.将整个实验分为两个阶段,前期实验选择在无风晴朗的夜晚,在距实验装置 5 m 处放置一轴流风机,利用轴流风机替代自然风进行二者关系的实验,轴流风机风量大、可以手动调节风速,便于实验结果的处理;后期实验选择在风况较好的夜晚,将实验装置进行自然风况下的实验来验证关系.在第二阶段的实验中,每次实验前首先获取实验地点的实时风向,调整装置以保证出射激光与风向垂直,确保实验数据受第三方影响降到最低,对前期实验得到的结论进行外场验证.

2.1 轴流风机条件下进行的实验

实验过程中,激光束在实验区域水平出射,调整轴流风机以保证风向与激光束垂直.除风向等气象条件外,还包括人类活动、背景干扰光等因素会对测量结果造成影响.因此将每次实验时间统一选在 20:00~20:30 时间段,进行多次实验,地点选在杭州下沙高教园区某高校科技楼 10 楼楼顶,距地面约为 35 m,距最近的主干道为 90 m,周围为居民区和大学城,无明显污染源.这样不仅最大限度地排除了街道来往车辆产生的汽车尾气等人类活动造成的干扰,而且避免了地面干扰光的影响.除地面干扰光外,背景干扰光还包括建筑物反射光、激光束的二次反射光等,因此在实验装置的 CCD 与镜头之间加装干涉滤光片,提高激光侧向散射信号和其它噪声信号的信噪比^[19],同时在实验过程中 CCD 采集回波信号时选择夜空为背景.

为探究风速和侧向散射光强总值的关系,设置激光雷达装置中 CCD 相机每隔 3s 获取一张激光侧向散射回波信号图,风速测量设备以同时间同频率获取风速值.在整个实验周期内,保证周围没有增设的工厂等污染源,可以认为大气气溶胶的粒径和密度基本保持不变.图 2(a)~(c)为经反色处理后不同风速条件下的激光侧向散射回波信号图,风速为 4.5 m/s 时的回波信号图整体亮度明显高于风速为 1.1 m/s 和 5.6 m/s 时的回波信号图亮度.

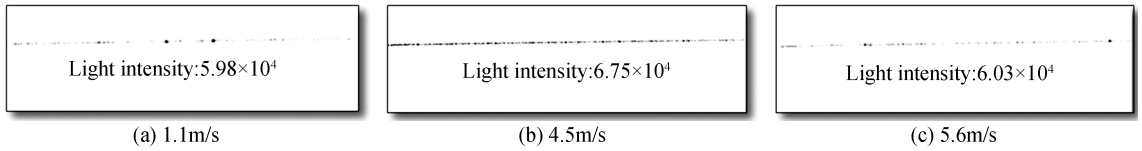


图 2 不同风速下的回波信号图

Fig.2 Echo signal diagrams with different speeds of wind

利用侧向散射激光雷达连续获取实验数据,并记录下实时风速.由于整个实验周期内无风条件下气溶胶浓度值会呈现出差异情况,但基本稳定在 $50 \sim 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内,记无风时近地面气溶胶浓度为 $Y(i)$, $Y(50 \sim 60)$ 、 $Y(60 \sim 70)$ 、 $Y(70 \sim 80)$ 分别表示无风情况下气溶胶浓度在 $50 \sim 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $60 \sim 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $70 \sim 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内的情况.在一次实验内取风速值相同的光强分布总值为一组数据并求其平均值,并根据一组光强总值数据的均值、最值计算出误差棒.在轴流风机条件下进行的实验采取间隔运行风机的方式,共选取 10 天内约 800 帧图像进行统计,以风速为横坐标,侧向散射光强总值为纵坐标,做如图 3 所示的 $Y(50 \sim 60)$ 、 $Y(60 \sim 70)$ 、 $Y(70 \sim 80)$ 分别对应风速与光强总值关系的误差棒图.考虑到实验过程中存在误差,如夜空中飞机闪过等突发状况,导致回波信号图的光强信息出现差异,将造成误差的实验数据排除.

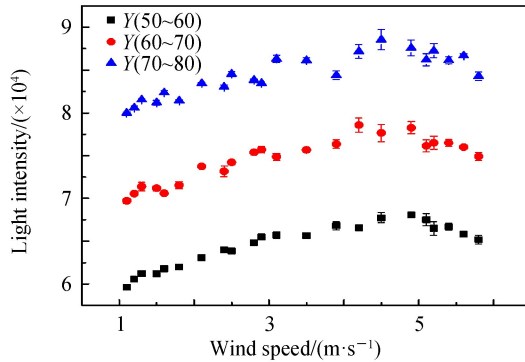


图 3 三种情况下风速与侧向散射光强的关系

Fig.3 Relationship between wind speed and side-scattering light intensity in three cases

如图 3 所示,风速范围在 $1 \sim 4.5 \text{ m/s}$ 时,随着风速增加,侧向散射光强总值呈现升高的趋势,当风速范围在 $4.5 \sim 6 \text{ m/s}$ 时,侧向散射光强总值随风速增加呈现降低的趋势.

具体而言,在实验周期内,对于 $Y(50 \sim 60)$,风速范围在 $1 \sim 4.9 \text{ m/s}$ 时,随着风速增加,光强总值由 5.96×10^3 增加到 6.81×10^3 ,当风速范围在 $4.9 \sim 6 \text{ m/s}$ 时,光强总值随风速增加由 6.81×10^3 下降到 6.50×10^3 ;对于 $Y(60 \sim 70)$,风速范围在 $1 \sim 4.2 \text{ m/s}$ 时,随着风速增加,光强总值由 6.97×10^3 增加到 7.86×10^3 ,当风速范围在 $4.2 \sim 6 \text{ m/s}$ 时,光强总值随风速的增加由 7.86×10^3 下降到 7.49×10^3 ;对于 $Y(70 \sim 80)$,风速范围在 $1 \sim 4.5 \text{ m/s}$ 时,随着风速增加,光强总值由 7.99×10^3 增加到 8.86×10^3 ,当风速范围在 $4.5 \sim 6 \text{ m/s}$ 时,光强总值随风速增加由 8.86×10^3 下降到 8.43×10^3 .除此之外,随着风速的增加,光强总值的获取误差增加,说明在风速增加后会致回波信号图的光强信息部分丢失.为了提升模型的精度,对数据进行归一化处理,得到关系图如图 4 所示.

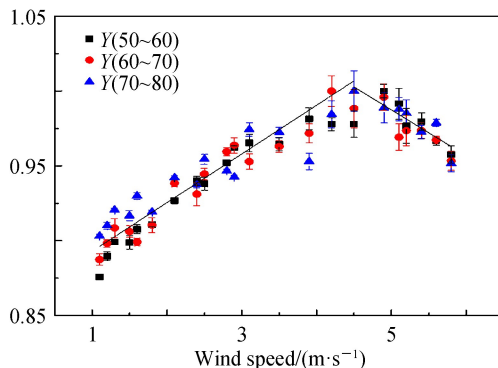


图 4 三种情况下风速与侧向散射光强关系归一化后示意图

Fig.4 The normalized relationship between wind speed and side-scattering light intensity in three cases

用 X 表示风速,对 $Y(50\sim60)$ 、 $Y(60\sim70)$ 、 $Y(70\sim80)$ 三组数据分别拟合,对于 $Y(50\sim60)$,当风速范围在 $1\sim4.9$ m/s 时得到的线性关系式为: $Y=(0.0299X+0.8597)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.93;风速范围在 $4.9\sim6$ m/s 时得到的线性关系式为: $Y=(-0.0451X+1.2192)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.91.

对于 $Y(60\sim70)$,当风速在 $1\sim4.2$ m/s 范围内得到的线性关系式为: $Y=(0.0321X+0.8589)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.92;风速范围在 $4.2\sim6$ m/s 时得到的线性关系式为: $Y=(-0.0264X+1.1118)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.78.

对于 $Y(70\sim80)$,当风速在 $1\sim4.5$ m/s 范围内得到的线性关系式为: $Y=(0.0238X+0.8842)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.86;风速范围在 $4.5\sim6$ m/s 时得到的线性关系式为: $Y=(-0.0318X+1.1463)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.77.

三组数据经归一化后,发现随气溶胶浓度的升高,风速与侧向散射光强关系拟合的相关系数减小.原因是在无风时气溶胶浓度较高的条件下进行实验受风速及其他环境因素影响更大,气溶胶浓度值的波动会增大,从而产生较大误差.

为了更加客观准确,综合图 4 中三组数据进行拟合度量量化分析,当风速范围在 $1\sim4.5$ m/s 时,风速每增加 1 m/s,光强总值增加了 3.7%,得到的线性关系式为: $Y=(0.0326X+0.8604)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.86;风速范围在 $4.5\sim6$ m/s 时,风速每增加 1 m/s,光强总值减少了 3.1%,得到的线性关系式为: $Y=(-0.0307X+1.1406)\times 10^3$,关系式相关系数为 0.68.

2.2 自然风条件下进行的外场实验

为了对上述实验得出的结论进行外场验证,在整个实验周期内选择风况较好的夜晚利用实验装置进行研究.图 5 为 2019 年 2~4 月杭州市下沙地区在 20:00~21:30 时段内监测的风向频率图,由图可见:监测各风向的出现频率由高到低依次为:东北风、西南风、东风、北风、南风、东南风、西北风,其中东北风出现频率最高,东北风是整个实验周期内的主导风向.在每次实验开始前应确认实时风向,调整实验装置以保证实验过程中出射激光与风向保持垂直,排除风向对实验结果造成的的影响,同时激光束在实验区域水平出射,验证上述关系模型.

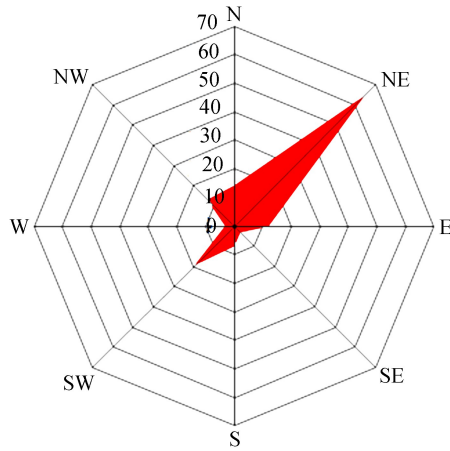


图 5 观测地区风向频率玫瑰图

Fig.5 Rose diagram of wind directions' frequency in the observation area

利用侧向散射激光雷达进行自然风条件下的实验并对实验结果进行相关性分析,绘制出在各个风向条件下实验装置监测到风速与侧向散射光强总值的关系曲线.由于实验测得的数据量巨大,仅展示以东北风为主导风向的风速与侧向散射光强总值的关系.除去因突发状况导致信号图光强信息出现差异以及场地无风时的采集数据,共选取 30 天内约 1 200 帧图像进行统计,绘制关系曲线如图 6(a)所示;并对该曲线进行归一化处理得到图 6(b),以便于分析模型.

如图 6(a)所示,从整体来看, $Y(50\sim60)$ 、 $Y(60\sim70)$ 、 $Y(70\sim80)$ 三种情况下光强总值均呈现出在当风速在 $1\sim4.5$ m/s 范围内随风速增加而增加,风速范围在 $4.5\sim6$ m/s 时随着风速增加而减少的趋势,这与在轴流风机下实验得到的结论一致.由图 6(a)可知,在自然风况下进行的实验其测量误差相比轴流风机作用下

得出实验结果的测量误差更大,其原因是轴流风机的作用区域很小,而自然风作用下进行的实验受周边环境影响增大,自然风会导致实验区域外的气溶胶及分子等颗粒物移动至探测区域。

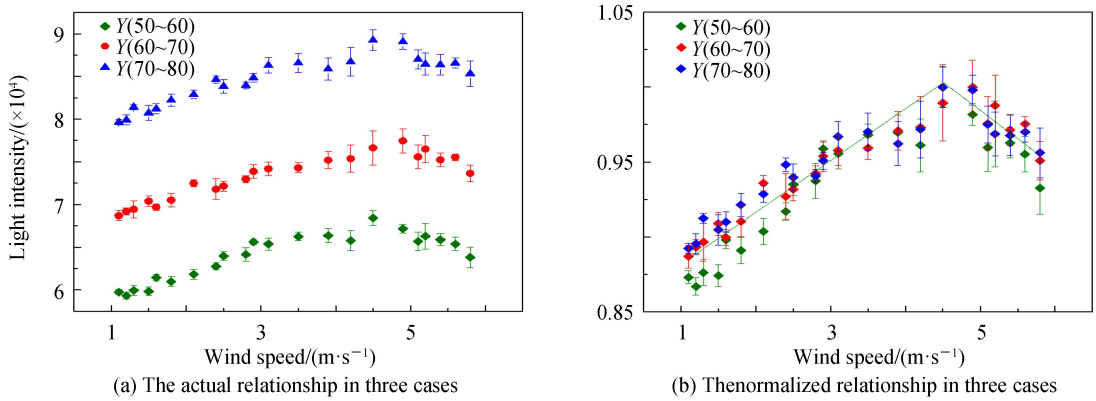


图6 风速与侧向散射光强关系曲线示意图

Fig.6 The relationship between wind speed and side-scattering light intensity

作为三个等级的关系曲线归一化拟合的结果,由图6(b)可得,当风速在1~4.5 m/s 范围内,风速每增加1 m/s,光强总值增加了3.9%,拟合得到的线性关系式为: $Y=(0.034\ 6X+0.847\ 2)\times 10^3$,关系式相关系数为0.89;风速在4.5~6 m/s 范围内,风速每增加1 m/s,光强总值减少了3.8%,得到的线性关系式为: $Y=(-0.037\ 8X+1.173\ 3)\times 10^3$,关系式相关系数为0.68.在整体上符合侧向散射光强总值随着风速的增加呈现出先增大后减小的趋势,验证了在轴流风机下实验得到的风速与侧向散射光强总值的关系模型的正确性。

记录整个实验周期内进行实验时的风向,在不同风向下进行风速与光强总值关系的实验,绘制出杭州某地区不同风向下光强总值随风速的变化情况如图7所示,并对实验结果进行分析。

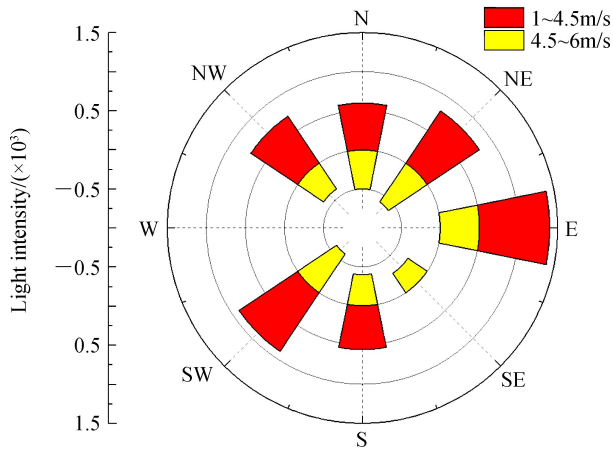


图7 杭州某地区光强总值随风速改变的变化情况示意图

Fig.7 The relationship between side-scattering light intensity and wind speed in Hangzhou of somewhere

根据图7,以正北方向为例:当风速范围在1~4.5 m/s 时,侧向散射光强总值随风速的增加而增加了 0.49×10^3 ;当风速范围在4.5~6 m/s 时,侧向散射光强总值随风速的增加减少了 0.67×10^3 .对光强总值与风速的关系曲线归一化处理,当风速范围在1~4.5 m/s 时,风速每增加1 m/s,光强总值增加了3.8%;风速在4.5~6 m/s 范围内,风速每增加1 m/s,光强总值减少了3.6%。

在实验周期内,在各个风向进行实验得到风速与侧向散射光强总值的关系变化趋势基本相同,都遵循当风速范围在1~4.5 m/s 时光强总值随风速的增加而增加,风速范围在4.5~6 m/s 时光强总值随风速的增加而减少的关系.可以合理猜想,在监测地区,低风速(1~4.5 m/s)情况下,风的运动会导致近地面扬尘、气溶胶等颗粒物悬浮累计,造成气溶胶浓度呈现升高的趋势;在中强风速(4.5~6 m/s)条件下,强风会使气溶胶扩散,造成监测区域的气溶胶浓度降低.验证了实验装置在轴流风机作用下得出关于风速与光强总值的关系,证实了基于CCD侧向散射激光雷达装置进行风速测量实验的合理性。

3 结论

实验分析了不同风速条件下侧向散射激光雷达的回波信号.实验装置获取侧向散射回波信号图后统计侧向散射光强总值,建立了光强总值与风速的关系模型.根据光强总值与气溶胶浓度的准线性关系发现,当风速范围在 1~4.5 m/s 时,气溶胶浓度随风速的增加而升高;而风速范围在 4.5~6 m/s 时,气溶胶浓度随风速的增加而降低,在各个风向上风速与气溶胶浓度值的变化趋势基本一致.基于监测地点建立合适的关系模型,可以利用回波信号的光强信息遥测风速.

参考文献

- [1] LI Jun, HU Fei. Correction for LiDAR measured error of wind flow on complex terrain[J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, **35**(5): 727-733.
李军,胡非.复杂地形下激光雷达测风误差的修正[J].可再生能源,2017, **35**(5):727-733.
- [2] SHEN Yan-xia, LI Fan. A survey of diagnosis methods for wind power system[J]. *Control Engineering of China*, 2013, **20**(5):789-795.
沈艳霞,李帆.风力发电系统故障诊断方法综述[J].控制工程,2013, **20**(5):789-795.
- [3] SHI Guang-yu, WANG Biao, ZHANG hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2008, **32**(4):826-840.
石广玉,王标,张华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应[J].大气科学,2008, **32**(4):826-840.
- [4] JIANG Zhong, SHI Guang-yu, CHEN Huan-sen. Analysis on aerosol concentration of Beijing during 1998-2001[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, **8**(4):495-502.
姜忠,石广玉,陈焕森.北京市 1998-2001 年大气气溶胶粒子数浓度分析[J].气候与环境研究,2003, **8**(4):495-502.
- [5] CAO Nian-wen, YAN Peng. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(11):28-34.
曹念文,颜鹏.基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J].光学学报,2014, **34**(11):28-34.
- [6] MA Xiao-min, TAO Zong-ming, MA Ming-jun, et al. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2):0201002.
麻晓敏,陶宗明,马明俊,等.基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法[J].光学学报,2014, **34**(2):0201002.
- [7] CHEN Song, HU Miao, ZENG Ran, et al. Measurement error of PM_{2.5} concentration based on side scattering lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(12): 1201003.
陈松,胡淼,曾然,等.基于侧向散射激光雷达的 PM_{2.5} 浓度测量误差[J].光学学报,2017, **37**(12): 1201003.
- [8] CHALOULAKOU A, KASSOMENOS P, SPYRELLIS N, et al. Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(5):649-660.
- [9] VARDOULAKIS S, KASSOMENOS P. Sources and factors affecting PM₁₀ levels in two European cities: Implications for local air quality management[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(17):3949-3963.
- [10] PUUSTINEN A, HÄMERI K, PEKKANEN J, et al. Spatial variation of particle number and mass over four European cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(31):6622-6636.
- [11] ZHENG Liang, ZHANG Tian-hua, ZHANG Hu, et al. Improvement of field calibration method for AWS wind direction measurement system[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, **42**(4):593-596.
郑亮,张天华,张虎,等.自动气象站风向测量系统现场校准方法改进的探讨[J].气象科技,2014, **42**(4):593-596.
- [12] LI Dong-mei, WANG Yang. The reaction-diffusion-advection model with spatial heterogeneity[J]. *Journal of HangZhouDianZi University(Natural Science)*, 2018, **38**(06): 94-98.
李冬梅,王阳.空间非均匀环境中的反应扩散移流模型[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2018, **38**(06):94-98.
- [13] KAVOURAS I G, ETYEMEZHIAN V, XU Jin, et al. Assessment of the local windblown component of dust in the western United States[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, **112**(D8): D08211.
- [14] BEAUMONT C D. Regression diagnostics-identifying influential data and sources of collinearity[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1981, **32**(2):157-158.
- [15] HU Miao, WU Duan-fa, LI Qi-liang, et al. Measurement study of PM_{2.5} concentration with side-scattering lidar based on CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(11):1101002.
胡淼,吴端法,李齐良,等.基于 CCD 侧向散射激光雷达的 PM_{2.5} 浓度测量研究[J].光学学报,2016, **36**(11):1101002.
- [16] DOU Xiao-lei, CHANG Jian-hua, LIU Zhen-xing, et al. An aerosol extinction coefficient inversion method based on Mie-scattering lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2019, **49**(9):1047-1053.
豆晓雷,常建华,刘振兴,等.基于 Mie 散射激光雷达的气溶胶消光系数反演方法[J].激光与红外,2019, **49**(9):1047-1053.
- [17] HU Miao, XIE Jia-liang, WU Duan-fa, et al. Measurement of PM_{2.5} concentration based on the charge-coupled device backward scattering lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2):0210002.

- 胡森,谢家亮,吴端法,等.基于 CCD 后向散射激光信号的 PM2.5 测量研究[J].光学学报,2015,**35**(2):0210002.
- [18] DONG Yun-sheng, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, *et al.* Lidar study of the aerosol characteristic in beijing during traffic controlled[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2):292-296.
- 董云升,刘文清,刘建国,等.北京城区限车期间气溶胶特征激光雷达观测研究[J].光学学报,2009,**29**(2):292-296.
- [19] ZHANG Xu-hui, SHEN Lei, SHUAI Tao. Study on the input power of passive hydrogen clock based on SNR analysis [J]. *Journal of HangZhouDianZi University(Natural Science)*, 2019, **39**(3): 32-36.
- 章旭晖,沈雷,帅涛.基于信噪比分析的被动氢钟输入功率研究[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2019,**39**(3): 32-36.