

漂浮式多普勒激光雷达低空风廓线反演方法

刘秉义^{1,2*}, 文强¹, 王琪超¹, 张凯临¹, 吴松华^{1,2}, 唐军武³¹中国海洋大学信息科学与工程学部, 山东 青岛 266100;²青岛海洋科学与技术试点国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;³青岛海洋科学与技术试点国家实验室“观澜号”海洋科学卫星工程部, 山东 青岛 266237

摘要 激光雷达能够提供高时空分辨率的大气风场数据, 为了提高激光雷达在海上浮标等运动平台上的观测精度, 开展了基于漂浮式测风激光雷达系统的海气边界层风场反演算法研究。利用自主研发的漂浮式测风激光雷达系统的观测数据, 使用浮标平台姿态和径向速度校正方法、速度方位显示(VAD)风场反演方法, 以及数据质量控制方法, 提高风廓线反演结果的准确性。将同步观测实验结果与风廓线反演结果进行比对验证, 结果表明水平风速和风向的比对误差分别为 0.3 m/s 和 2.0°, 决定系数分别为 0.986 和 0.996, 表明了漂浮式激光雷达风廓线反演算法的准确性。

关键词 海洋光学; 激光雷达; 浮标; 风廓线; 反演算法; 质量控制

中图分类号 P425

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2401002

Inversion Method for Low-Altitude Wind Profile Based on Floating Doppler Lidar

Liu Bingyi^{1,2*}, Wen Qiang¹, Wang Qichao¹, Zhang Kailin¹, Wu Songhua^{1,2}, Tang Junwu³¹Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;²Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, Shandong, China;³Engineering Department of Guanlan Satellite for Ocean Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, Shandong, China

Abstract Lidar is able to provide atmospheric wind field data with high spatial-and-temporal resolution. To improve the observation precision of lidars on offshore buoys and other moving platforms, an inversion algorithm for the wind field in the marine atmospheric boundary layer based on a floating wind lidar system is investigated. With the data observed by the self-developed floating wind lidar system, the methods of correcting the attitude and radial velocity of the buoy platform, the velocity-azimuth display (VAD)-based inversion method for the wind field, and the data quality control method are employed to improve the accuracy of the inversion results of wind profiles. The results of the simultaneous observation experiments are compared with the inversion results of the wind profiles for verification. The comparison shows that the matching errors in the horizontal wind speed and wind direction are 0.3 m/s and 2.0°, respectively, and the coefficients of determination of the two factors are 0.986 and 0.996, respectively, indicating the accuracy of the proposed inversion algorithm for wind profiles based on floating lidar.

Key words oceanic optics; lidar; buoy; wind profile; inversion algorithm; quality control

1 引言

多普勒激光雷达具有高时空分辨率、高精度大气风场探测能力, 已成功被应用于小尺度风场、湍流和风切变的观测^[1-5]。为了满足不同观测场景的需求, 目前

已发展出基于车载^[6]、机载^[7]、星载^[8]、船载^[9]和漂浮式平台^[10]的多种激光雷达系统。其中, 漂浮式激光雷达系统可以长期布放于海上, 具有对海气边界层风场进行长时间连续观测的能力。

利用漂浮式测风激光雷达系统在海上进行实验

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-05-09; 录用日期: 2022-05-16

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1408001, 2019YFC1408002)

通信作者: *liubingyi@ouc.edu.cn

时,浮标和激光雷达会随海浪漂移和摇摆,在运动的条件下如何保证风速和风向的准确性是需要解决的问题。目前有两种常用的解决方法。第一种方法是采用机械装置进行运动补偿^[10],以减小支撑结构的移动幅度。仅在设备移动幅度足够小的情况下进行测量,从而忽略运动对测量精度的影响。Tiana-Alsina 等^[11]提出了一种安装在浮标上的多普勒测风激光雷达的机械补偿装置,来减小激光雷达运动对风速测量的影响。第二种方法是测量浮标的运动,并在数据处理中使用运动补偿算法纠正其对测量的影响。Kelberlau 等^[12]提出了一种使用激光雷达径向速度和浮标平台高频运

动数据的运动补偿算法,并且验证了该方法的有效性。

英国 Carbon Trust 提出了海上风电加速计划 (OWA),首次提出了漂浮式激光雷达测风技术发展路线的技术指导框架,制定了漂浮式激光雷达在 4~16 m/s 风速段中测风数据质量验收的标准,具体标准如表 1 所示^[13],风速拟合方程为 $y = ax$,风向拟合方程为 $y = ax + b$,其中 a 为斜率, b 为截距。能否满足 OWA 提出的漂浮式激光雷达测风数据质量验收的标准是检验一套漂浮式测风激光雷达系统的可靠性和测风数据的准确性的重要评判标准。

表 1 漂浮式激光雷达测风数据质量验收的标准

Table 1 Criteria for quality acceptance of floating lidar wind measurement data

Statistical indicator	Optimal range	Acceptable range
Slope returned from linear regression of mean wind speed	0.98-1.02	0.97-1.03
Wind speed determination coefficient	>0.98	>0.97
Slope returned from linear regression of mean wind direction	0.97-1.03	0.95-1.05
Wind direction determination coefficient	>0.97	>0.95
Absolute value of wind direction deviation	<5°	<10°

Gottschall 等^[14]在德国北海对 Wind-Lidar 型漂浮式测风激光雷达系统的性能进行了验证。该海试地点以东南风为主,在 100 m 海拔高度处的年平均风速为 9.9 m/s,测量结果表明风速数据的决定系数为 0.996。Hsuan 等^[15]在台湾地区南部的兴达港对 WindSentinel 型漂浮式激光雷达系统进行了验证和测量。在试验期间,该海试地点以北风为主,在 50~200 m 高度范围内的平均风速约为 5.3 m/s。结果显示,10 min 内平均的风速、风向的决定系数均大于 0.98。Gutiérrez-Antuñano 等^[16]介绍了 EOLOS FLS200 型漂浮式激光雷达进行的第一阶段试点验证试验的结果。他们采用了同向风向校正算法和基于阈值的离散数据过滤算法,结果表明风速决定系数为 0.988,风向决定系数为 0.999,都满足了 OWA 标准的要求。

随着海洋环境监测预报、极端天气监测预警和海上风资源勘测开发等需求的增加^[17],海上动平台的运动姿态校正和激光雷达风场反演算法的进一步研究有助于推进激光雷达在浮标等海上动平台上的应用,弥补现有常规观测手段的不足,进一步提高激光雷达对海气边界层内风廓线观测数据的获取能力。本文开展了基于漂浮式测风激光雷达系统的海气边界层风场反演算法和质量控制方法的研究,通过同步观测实验,对风廓线反演结果进行比对验证,表明了漂浮式激光雷达风廓线反演算法的准确性。

2 漂浮式多普勒激光雷达反演算法

2.1 漂浮式测风激光雷达系统

漂浮式测风激光雷达系统主要由相干多普勒激光

雷达和浮标平台两部分组成,其中:漂浮式相干多普勒激光雷达作为主要观测单元;海上浮标作为载荷平台,用于搭载激光雷达和各种传感器等器件。

本文使用的漂浮式测风激光雷达系统如图 1 所示。该激光雷达系统配备的相干多普勒激光雷达采用 1550 nm 激光作为信号光源,通过相干探测实现多普勒频移的测量,相干多普勒激光雷达的主要技术指标如表 2 所示。该激光雷达系统主要由光电子系统和机械子系统两部分组成,其中:光电子系统包含激光发射模块、扫描伺服模块、光学接收模块、信号采集与处理模块;机械子系统包含外壳结构、支撑结构和散热结构。激光雷达连同全球卫星导航系统 (GNSS)、惯性参考系统 (IRS)、气象传感器和通讯装置等安装于直径为 10 m 的大型海洋浮标上。

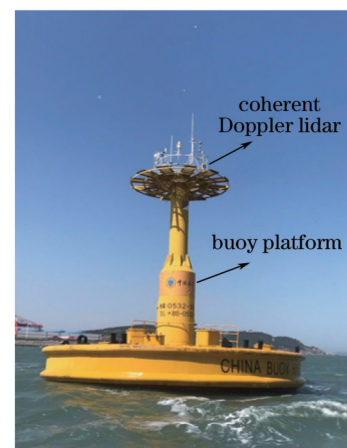


图 1 漂浮式测风激光雷达系统
Fig. 1 Floating wind lidar system

表 2 相干多普勒激光雷达主要技术指标

Table 2 Key technical specifications of coherent Doppler lidar

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	1550
Pulse energy / μJ	20
Repetition rate /kHz	10
Height range of wind measurement /m	10-300
Measurement range of wind speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0-75
Measurement range of wind direction /($^\circ$)	0-360
Uncertainty of wind speed measurement /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	≤ 0.1
Uncertainty of wind direction measurement /($^\circ$)	≤ 3

2.2 浮标平台姿态校正算法

漂浮式测风激光雷达系统在进行海上观测时,由于受到浮标晃动的影响,激光指向会发生一定偏移,从而改变水平风速和垂直风速在激光径向方向上的速度分量,因此需要在风场反演过程中对浮标的姿态变化和运动速度进行校正,消除其对风场反演的影响。通过姿态校正算法,利用惯性参考系统实时测量的浮标姿态信息和激光雷达相对于浮标平台的指向信息进行数据校正,去除浮标平台运动导致的径向速度分量,从而获取真实的大气风场引起的径向速度。

根据激光雷达扫描测量时设定的方位、俯仰角度和实时测量的浮标姿态数据,通过坐标转换计算得到激光光束在地理坐标系中的实际指向角度^[6]。

在浮标平台坐标系内, φ_0 是激光光束的方位角, θ_0 是激光光束的俯仰角。在浮标坐标系内发射激光光束的方向为

$$\mathbf{r}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \sin \varphi_0 \\ \cos \theta_0 \cos \varphi_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

浮标平台的姿态可以用航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横摇角 ϕ 表示。在地理坐标系内发射激光光束的方向为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = (\mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2 \mathbf{H}_3)^{-1} \mathbf{r}_0, \quad (2)$$

式中: \mathbf{H}_1 、 \mathbf{H}_2 和 \mathbf{H}_3 分别是横摇角、俯仰角和航向角的旋转矩阵,其公式为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

当计算得到单位向量 \mathbf{r} 时,就可以得到发射激光

光束在地理坐标系内的方位角 φ_1 和俯仰角 θ_1 ,二者的表达式为

$$\varphi_1 = \arctan(x/y), \quad (6)$$

$$\theta_1 = \arcsin z_0. \quad (7)$$

2.3 浮标平台运动速度校正算法

漂浮式测风激光雷达系统在海浪作用下发生的运动在地理坐标系下可以分解为北向运动速度 V_n 、东向运动速度 V_e 和向上的运动速度 V_u 。通过姿态校正算法得到发射激光径向方向的方位角 φ_1 和俯仰角 θ_1 ,可以将浮标平台的运动速度进行矢量分解,投影到径向方向上,即

$$V_{\text{horizontal}} = V_n \cdot \cos \varphi_1 + V_e \cdot \sin \varphi_1, \quad (8)$$

$$V_{\text{vertical}} = V_u, \quad (9)$$

$$V_{\text{LOS_buoy}} = V_{\text{horizontal}} \cdot \cos \theta_1 + V_{\text{vertical}} \cdot \sin \theta_1, \quad (10)$$

式中: $V_{\text{horizontal}}$ 和 V_{vertical} 分别为浮标平台的运动速度投影到地理坐标系中水平方向和垂直方向上的运动速度; $V_{\text{LOS_buoy}}$ 为浮标平台的运动速度投影到发射激光的径向(LOS)方向上的运动速度,即浮标平台运动对激光雷达测量的径向速度的贡献。对激光雷达在发射激光径向方向上各个距离库处观测到的径向速度进行校正后,可获得由大气风场引起的真实径向速度,即

$$V_{\text{LOS}}(\varphi_1, \theta_1) = V_{\text{measured}}(\varphi_1, \theta_1) + V_{\text{LOS_buoy}}(\varphi_1, \theta_1), \quad (11)$$

式中: V_{LOS} 为激光雷达在方位角 φ_1 和俯仰角 θ_1 情况下获取的大气风场对应的径向风速; V_{measured} 为激光雷达运动状态下测得的径向速度。

2.4 基于速度方位显示的风场反演方法

本文使用基于速度方位显示(VAD)的风场反演方法^[18],利用校正后的径向风速数据进行大气风廓线的反演。该方法假设相同高度上水平风场均匀,使用固定俯仰角和连续改变方位角的方式获得径向风速测量数据,并通过拟合算法获得风场信息。在忽略垂直风速的情况下,方位角 φ_2 、俯仰角 θ_2 方向上的径向风速 $V_{\text{LOS}}(\varphi_2, \theta_2)$ 与水平风速 V 和水平风向 Φ 之间的关系为

$$V_{\text{LOS}}(\varphi_2, \theta_2) = V \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \left(\varphi_2 + \frac{3\pi}{2} - \Phi \right). \quad (12)$$

实测的径向风速为随方位角正弦变化的一系列点,如图2所示。通过最小二乘法找到与实测径向风速值(图2中散点所示)最接近的理想风速曲线(图2中实线所示),即可获得待求解的水平风速 V 和水平风向 Φ 。

3 水平风场反演过程

3.1 风场反演流程

基于浮标平台的角度信息和激光雷达的径向角度信息,可以获得激光雷达在地理坐标系下的真实径向角度,结合浮标平台的运动速度信息,即可获得浮标平台运动在各个激光径向中引起的速度分量。在激光雷

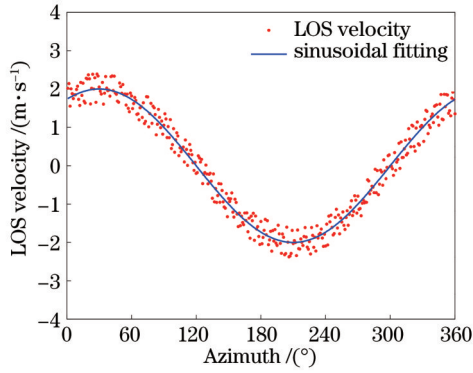


图 2 VAD 正弦拟合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VAD sinusoidal fitting

达观测的原始径向速度分量中校正浮标运动径向速度分量,即可获得由大气风场引起的径向风速。获得激光雷达各径向在地理坐标系下的真实指向和径向风速后,即可采用 VAD 风场反演算法,实现水平风速风向反演。具体反演流程如图 3 所示。

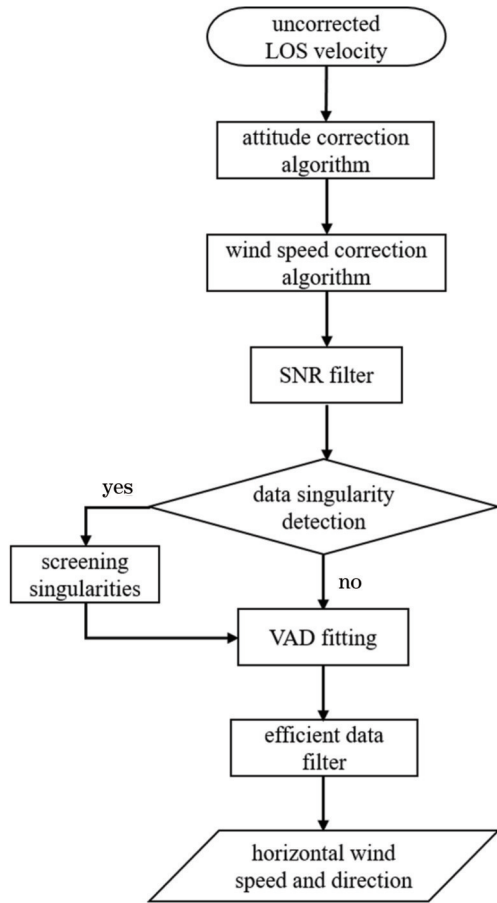


图 3 漂浮式测风激光雷达风场反演流程图

Fig. 3 Flow chart of wind field retrieval by floating wind lidar

首先,采用运动平台的姿态校正算法对未校正的径向风速进行校正,获得移动测量期间激光雷达径向的真实方位角和俯仰角。然后,采用运动平台的风速校正算法对由浮标平台运动所带来的径向速度误差进

行校正。对激光雷达在发射激光径向方向上各个距离库处观测到的径向速度进行校正后,可获得由大气风场运动引起的真实径向速度。接着,采用质量控制方法^[19],通过设置一系列不同阈值来达到最佳的反演效果。采用信噪比(SNR)阈值法,设置信噪比的上下限阈值,若存在数据点的信噪比低于下限阈值或者高于上限阈值,则将该数据点予以剔除。最后,将满足信噪比阈值的数据进行数据奇异点检测,通过 VAD 反演方法拟合出正弦曲线,计算出风速数据的残差,确定合适的阈值,将超出阈值的数据点剔除。在剔除超出阈值的数据点后,将满足阈值要求的数据进行 VAD 拟合,并检测数据是否满足数据有效率的要求,以得到最终的水平风速和风向。

3.2 数据质量控制方法

3.2.1 信噪比阈值法

相干多普勒激光雷达接收到的回波信号不仅包含大气散射信号,还包含光电探测器等产生的噪声信号。噪声信号混杂在有用信号中会造成较大的干扰,若不剔除,则会影响风场反演的准确性。

在对相干多普勒激光雷达接收到的原始回波信号进行处理时,先进行快速傅里叶变换得到原始谱数据,再将频谱数据进行平均,同时去除背景噪声,以此来提高原始回波信号的信噪比。在进行峰值检测后,计算信噪比和多普勒频移,最后可得到原始的径向风速数据。在对径向风速数据进行处理时,需要通过设置信噪比上下限阈值去除信噪比过低和过高的非真实风速信号,以保证最终得到的信号的有效性,从而确保风场反演精度的准确性。

3.2.2 残差阈值法

在统计学中,残差是指实际的观测值与根据回归方程预测得到的估计值之间的差。在 VAD 风速拟合过程中,对风速进行残差分析,就可以判断风速拟合数据的可靠性。在风速残差分析中,将相同方位角下拟合得到的径向风速与实际测量得到的径向风速之差定义为径向风速残差 e ,可以表示为

$$e_i = V_i(\theta_i) - V_o(\theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

式中: $V_i(\theta_i)$ 和 $V_o(\theta_i)$ 分别为方位角 θ_i 为时的径向风速拟合值和径向风速实测值; n 为径向风速数据点总数。径向风速残差可以有效地反映风速拟合值与实际测量风速值之间的偏差。同时,将径向风速残差的平均值定义为径向风速平均残差,可以表示为

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}. \quad (14)$$

在 VAD 反演算法中,通过对径向风速残差和径向风速平均残差设置阈值来剔除识别出的异常数据点,从而提高径向风速拟合数据的精度。具体判别方法是:当拟合数据的径向风速残差大于设定的阈值时,将该数据视为异常点,将其剔除掉。同样,当一组拟合数据计算得到的径向风速平均残差大于设定的阈值时,

也视该组数据为异常数据并剔除。

3.2.3 数据有效率阈值法

将数据有效率 r_e 定义为经过质量控制后保留的有效数据点数与观测数据点数之比,可以表示为

$$r_e = \frac{N_e}{N_s}, \quad (15)$$

式中: N_e 为有效数据点数; N_s 为观测数据点数。采用信噪比阈值法、残差阈值法对径向风速的拟合值进行质量控制时,会将个别数据点剔除,从而导致最终参与平均的点数有一定程度的降低。在数量下降超过一定阈值后,这些数据点就无法代表真实的观测数据,利用平均得到的结果也就无法真实地反演出风速风向等信息。因此,在进行质量控制后,需要通过数据有效率排除质量控制对数据真实性的影响。

4 海上实验与对比验证

4.1 海上实验概况

文中使用基于大型 10 m 浮标的漂浮式测风激光

雷达系统海试期间的风廓线测量数据对反演方法进行验证。2021 年 5 月—11 月,漂浮式测风激光雷达系统布放在某海上风电场中,布放水深约 30 m。根据国家基本气象站历史测风资料,该海试地点风向以东北至东南风为主,平均风速为 3.0 m/s。漂浮式测风激光雷达采用 71° 仰角的四波束多普勒波束摆动 (DBS) 扫描 (各波束的方位角间隔为 90°) 模式实现对风场剖面的观测,完成一个周期内 4 个径向方向的测量约需 4 s,可以降低观测周期内风场非均匀性引入的测量误差。漂浮式测风激光雷达的测量高度范围为 10~300 m。测量现场安装有测风塔和固定式激光雷达,二者均经过标定,将其测风数据作为漂浮式激光雷达比对印证的参考数据。测风塔和固定式激光雷达覆盖 12 个高度,其中 33、53、63、73、83、88、93 m 高度处的数据由测风塔测量,103、133、183、233、283 m 处的数据由固定式激光雷达测量,二者的主要技术指标如表 3 所示。

表 3 参考设备的主要技术指标

Table 3 Key technical specifications of reference instruments

Parameter	Offshore wind tower	Fixed wind lidar
Height range of wind measurement /s	30-100	30-300
Measurement range of wind speed / (m·s ⁻¹)	0.3-75.0	0-75
Measurement range of wind direction / (°)	0-360	0-360
Accuracy of wind speed measurement / (m·s ⁻¹)	0.2	0.1
Accuracy of wind direction measurement / (°)	1	1

4.2 漂浮式激光雷达风场反演结果比对验证

利用漂浮式测风激光雷达系统于 2021 年 6 月 25 日在海上实验中的测量数据与参考风场数据进行比对分析。利用 1.2 节所述的运动平台姿态校正算法对径向风速数据进行姿态校正,再利用 1.3 节所述的径向速度校正算法得到真实的径向风速数据,最后对径向风速数据进行质量控制,剔除数据奇异点,得到最终的漂浮式测风激光雷达风廓线测量结果。在质量控制过程中,将信噪比的有效范围设置为 10~200,径向风速拟合的残差阈值设置为 0.5 m/s,数据有效率阈值设置为 50%。采用矢量平均方法^[20]对秒级风廓线数据进行径向平均,得到 10 min 内平均的水平风速和风向。对漂浮式激光雷达的风廓线数据按照测风塔和固定式激光雷达参考数据的测量高度进行线性插值后,共计得到 1042 组有效数据。经过质量控制后,剩下 1000 组有效数据,占全部数据的 96%。

利用漂浮式测风激光雷达在 2021 年 6 月 25 日测量得到的径向风速反演得到的 10 min 内平均的水平风速、风向廓线的时间高度指示器 (THI) 图,如图 4 (a)、(d) 所示,其中部分空白区域代表质量控制时所剔除的数据点。海上测风塔和固定式激光雷达测量的作为参考数据的水平风速、风向 THI 图如图 4 (b)、(e) 所示。漂浮式激光雷达风廓线与参考风场的水平风速、

风向差值如图 4 (c)、(f) 所示。从整体上来看,漂浮式测风激光雷达反演得到的如图 4 (a) 所示的水平风速和如图 4 (d) 所示的风向与参考设备测量得到的如图 4 (b) 所示的水平风速和如图 4 (e) 所示的风向具有很好的一致性。二者的水平风速均具有随着高度增加逐渐增大的趋势,19:00 时 280 m 高度处的水平风速最大值接近 15 m/s。二者的风向均随高度有一定的变化,尤其是在 200 m 高度下均存在明显的风向转向过程。在 00:00—06:30 时段内,水平风速逐渐由 5~6 m/s 减小至 2~3 m/s,风向由 00:00 左右的偏东风逐渐变为 02:00 左右的偏南风、04:00 左右的偏西风和 06:30 左右的偏北风。在 06:30—11:30 时段内,风速逐渐增大至 4~5 m/s,风向逐渐由偏北风转为东南风。在 12:00—20:00 时段内,风向始终为偏南风,风速继续表现出增大的趋势。在 20:00—24:00 时段内,风向基本为西南风,且风速明显变小。如图 4 (c) 所示,漂浮式激光雷达反演的水平风速与参考设备测量的水平风速之间的差值绝大部分在 -1~1 m/s 范围内,差值最大值为 1.12 m/s。由图 4 (f) 可知,漂浮式激光雷达反演的风向与参考设备测量的风向之间的差值绝大部分在 -10°~10° 范围内,风速小于 2 m/s 时受风向本身波动较大的影响,存在少量风向偏差稍大的点。总体上来看,漂浮式激光雷达系统反演的水平风速、风向的时

空变化特征与参考设备的测量结果具有很好的— 致性。

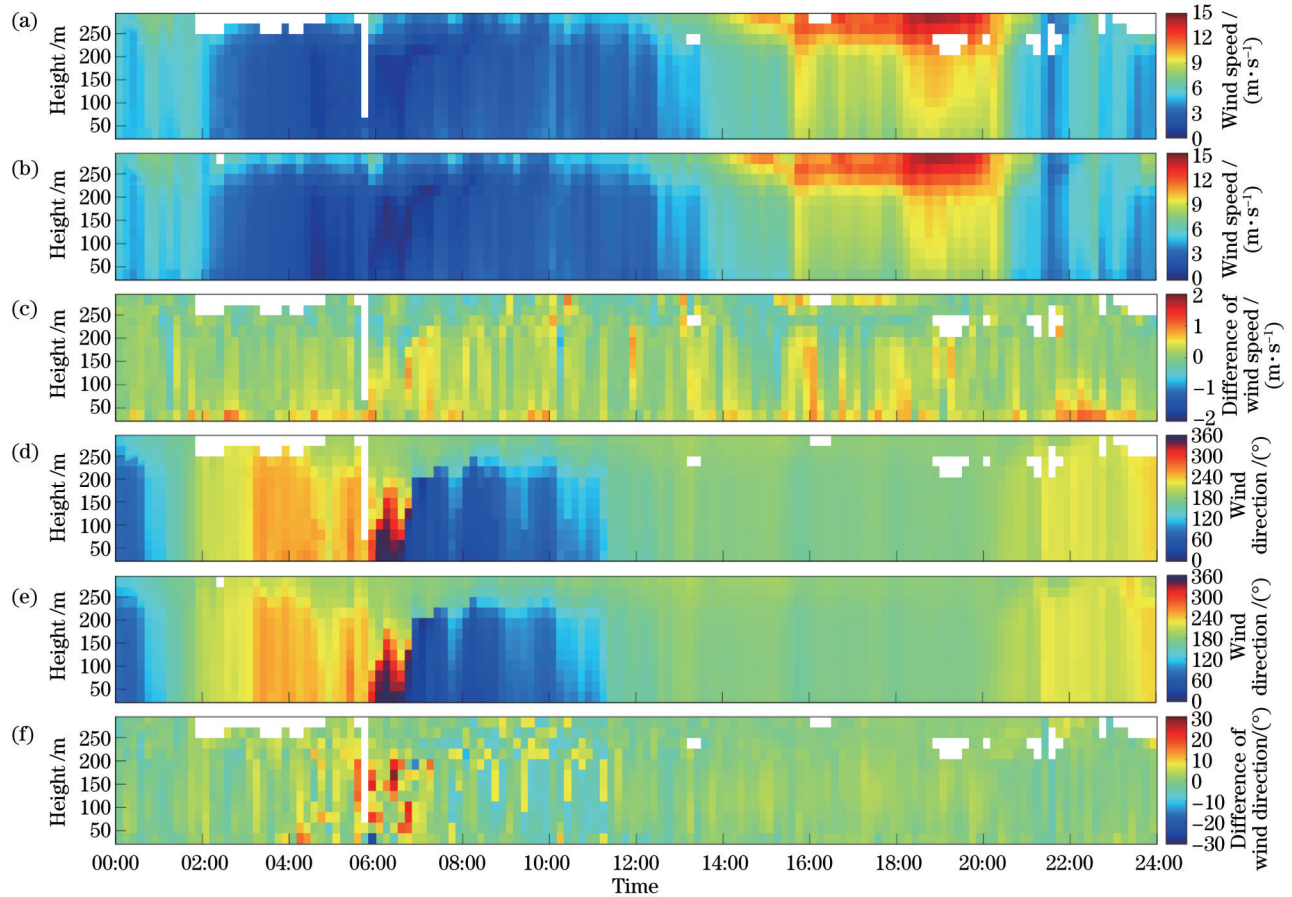


图 4 2021 年 6 月 25 日, 漂浮式测风激光雷达、海上测风塔和固定式激光雷达测量的水平风速、风向。(a) 漂浮式测风激光雷达测量的水平风速; (b) 海上测风塔和固定式激光雷达测量的水平风速; (c) 水平风速差值; (d) 漂浮式测风激光雷达测量的风向; (e) 海上测风塔和固定式激光雷达测量的风向; (f) 风向差值

Fig. 4 Horizontal wind speed and wind direction measured by floating wind lidar, offshore wind tower and fixed wind lidar on June 25, 2021. (a) Horizontal wind speed measured by floating wind lidar; (b) horizontal wind speed measured by offshore wind tower and fixed wind lidar; (c) difference of horizontal wind speed; (d) wind direction measured by floating wind lidar; (e) wind direction measured by offshore wind tower and fixed wind lidar; (f) difference of wind direction

以 2021 年 6 月 25 日 00:10—00:20 时段 10 min 内的平均数据为例, 对漂浮式激光雷达风场反演结果进行了比对分析, 如图 5 所示。图 5(a)、(b) 分别为漂浮式激光雷达与参考设备的水平风速、风向的比对情况, 图 5(c)、(d) 分别为二者之间的水平风速、风向差值。在图 5 中, 点线表示未经过浮标平台姿态和速度校正, 以及质量控制的漂浮式激光雷达反演结果, 虚线表示经过姿态和速度校正, 但未经过质量控制的反演结果, 实线表示经过姿态和速度校正, 以及质量控制的数据, 点划线表示用于比对的参考风场数据。可以发现: 在未经浮标平台姿态和速度校正, 以及质量控制的情况下, 水平风速廓线的平均偏差约为 0.52 m/s, 风向廓线的平均偏差约为 10.54°; 在进行浮标平台姿态和速度校正, 但未经质量控制的情况下, 水平风速廓线的平均偏差约为 0.16 m/s, 风向廓线的平均偏差约为 2.33°; 在进行浮标平台姿态和速度校正, 以及质量控

制后, 水平风速廓线的平均偏差约为 0.07 m/s, 风向廓线的平均偏差约为 2.27°。由比对结果可知, 浮标平台姿态和速度校正算法使风速、风向误差分别减小约 69% 和 78%, 在此基础上进行质量控制使风速、风向误差进一步减小约 56% 和 3%。

参考表 1 所示的 OWA 标准选取 4~16 m/s 风速范围内的 10 min 平均风场数据进行分析。漂浮式激光雷达反演的水平风速、风向与参考数据在质量控制前后的对比结果如图 6 所示, 其中 N 代表数据组数。图 6(a)、(c) 分别为漂浮式激光雷达未经浮标姿态、速度校正, 以及质量控制的水平风速、风向数据对比的散点图。图 6(b)、(d) 分别为漂浮式激光雷达经过姿态、速度校正, 以及质量控制后的水平风速、风向数据对比的散点图。横坐标为参考设备的结果, 纵坐标为漂浮式激光雷达的结果。由图 6 可知: 原有的 1042 组数据经过质量控制后剩余 1000 组, 剔除率约 4%; 水平风速

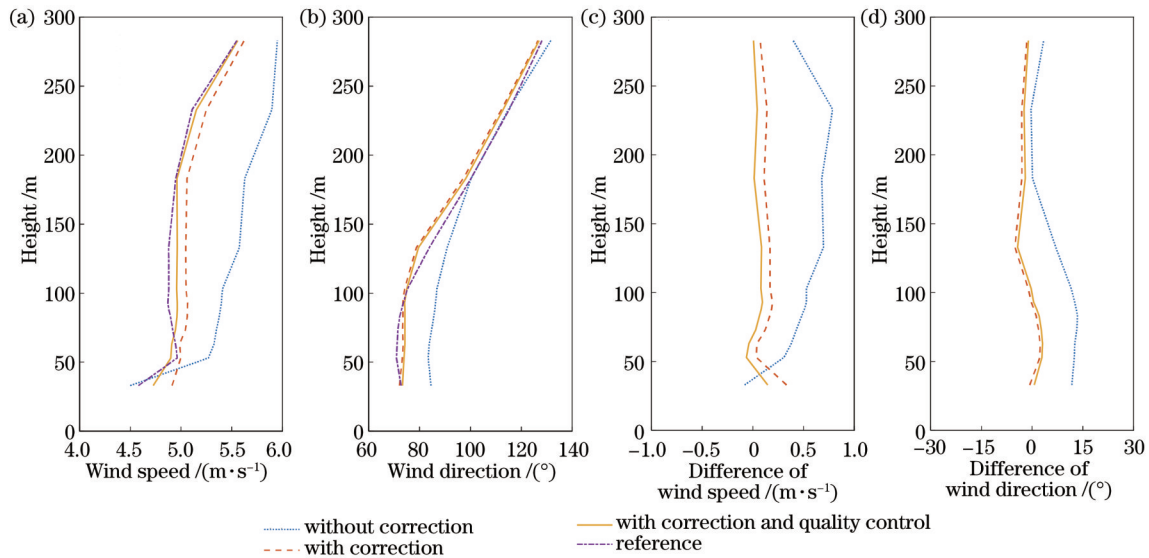


图 5 2021 年 6 月 25 日 00:10—00:20 时段内测量的平均水平风速、风向。(a) 水平风速; (b) 风向; (c) 水平风速差值; (d) 风向差值
 Fig. 5 Averaged horizontal wind speed and wind direction measured from 00:10 to 00:20 on June 25, 2021. (a) Horizontal wind speed; (b) wind direction; (c) difference of horizontal wind speed; (d) difference of wind direction

的相关系数(r)提高了约 15%, 决定系数(r^2)提高了约 33%, 标准偏差(SD)降低了约 77%, 偏离率(Bias)降低了约 55%; 风向的相关系数提高了约 0.3%, 决定系数提高了约 0.6%, 标准偏差降低了约 30%, 偏离率降

低了约 56%。由此可见, 对漂浮式激光雷达的测量数据进行浮标平台姿态、速度校正, 以及数据质量控制后, 反演得到的水平风速和风向数据精度能够得到有效提高。

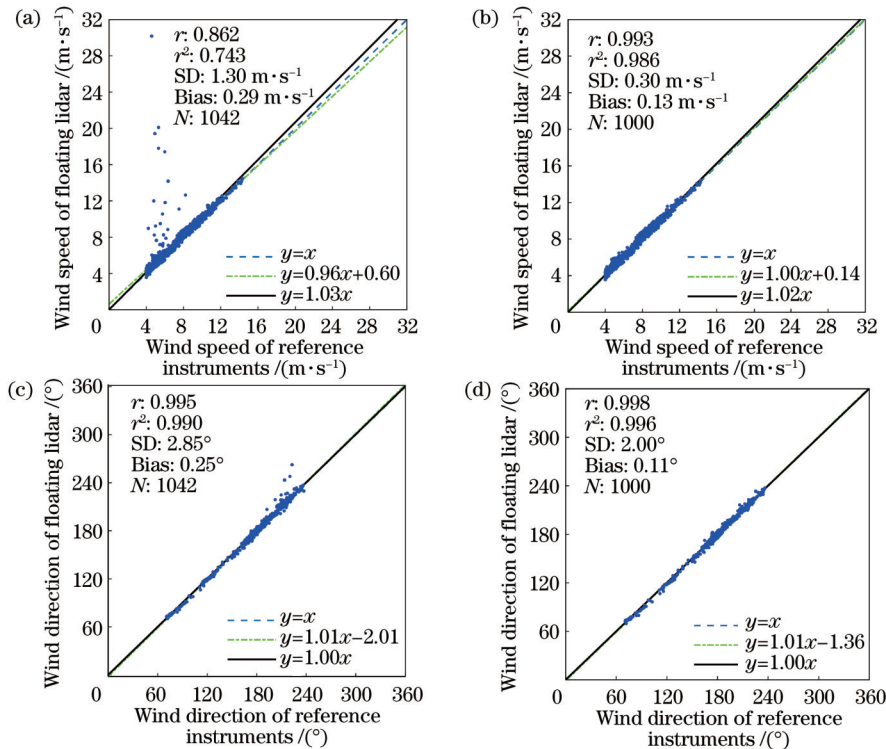


图 6 质量控制前后的 10 min 平均风速、风向散点图。(a) 质量控制前的风速; (b) 质量控制后的风速; (c) 质量控制前的风向; (d) 质量控制后的风向
 Fig. 6 Scatter plots of 10 min-averaged wind speed and wind direction before and after quality control. (a) Wind speed before quality control; (b) wind speed after quality control; (c) wind direction before quality control; (d) wind direction after quality control

5 结 论

针对海上漂浮式测风激光雷达进行了风场反演算

法研究, 通过对浮标平台姿态和运动速度进行校正, 以及对测量的径向风速数据进行质量控制, 实现了基于漂浮式激光雷达的低空风廓线反演算法。同时, 通过

在海试期间开展的同步观测实验验证了反演算法的可靠性和准确性。参考 OWA 标准,对 10 min 平均风场数据的比对分析表明,经过浮标姿态、速度校正,以及质量控制算法处理后,由漂浮式激光雷达低空风廓线反演算法反演得到的风速测量误差由 1.30 m/s 降到 0.30 m/s(降低了约 77%),风向测量误差由 2.85° 降到 2.00°(降低了约 30%),指标均能满足 OWA 标准对漂浮式激光雷达观测数据的比对精度要求,表明了漂浮式激光雷达风廓线反演结果的准确性。

参 考 文 献

- [1] Liu Z S, Liu B Y, Wu S H, et al. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1485-1487.
- [2] 宋小全, 龙文睿, 云龙, 等. 多普勒激光雷达多波束测风精度及获取率分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1001001. Song X Q, Long W R, Yun L, et al. Analysis of accuracy and acquisition rate of Doppler lidar multi-beam wind measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1001001.
- [3] 王筱晔, 吴松华, 刘晓英, 等. 基于相干多普勒激光雷达的飞机尾涡观测[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0901001. Wang X Y, Wu S H, Liu X Y, et al. Observation of aircraft wake vortex based on coherent Doppler lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0901001.
- [4] 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. 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.
- [5] 沈法华, 庄鹏, 王邦新, 等. 瑞利-米散射多普勒激光雷达低层风场反演方法研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1110005. Shen F H, Zhuang P, Wang B X, et al. Research on retrieval method of low-altitude wind field for Rayleigh-Mie scattering Doppler lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110005.
- [6] Liu B Y, Liu Z S, Song X Q, et al. Modifications and moving measurements of mobile Doppler lidar[J]// *Proceedings of Dragon 2 Programme Mid-Term Results 2008-2010*, May 17-21, 2010, Guilin, China. [S.l.: s.n.], 2010.
- [7] Billbro J, Fichtl G, Fitzjarrald D, et al. Airborne Doppler lidar wind field measurements[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1984, 65(4): 348-359.
- [8] 陈炳龙, 杨忠东, 闵敏, 等. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190003. Chen B L, Yang Z D, Min M, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190003.
- [9] Zhai X C, Wu S H, Liu B Y, et al. Shipborne wind measurement and motion-induced error correction of a coherent Doppler lidar over the Yellow Sea in 2014[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(3): 1313-1331.
- [10] Gottschall J, Gribben B, Stein D, et al. Floating lidar as an advanced offshore wind speed measurement technique: current technology status and gap analysis in regard to full maturity[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2017, 6(5): e250.
- [11] Tiana-Alsina J, Gutiérrez M A, Würth I, et al. Motion compensation study for a floating Doppler wind LiDAR [C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 26-31, 2015, Milan, Italy. New York: IEEE Press, 2015: 5379-5382.
- [12] Kelberlau F, Neshaug V, Lønseth L, et al. Taking the motion out of floating lidar: turbulence intensity estimates with a continuous-wave wind lidar[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 898.
- [13] Carbon Trust Offshore Wind Accelerator (OWA). Carbon trust offshore wind accelerator roadmap for the commercial acceptance of floating lidar technology [EB/OL]. (2018-10-09) [2022-05-07]. <https://www.carbontrust.com/resources/roadmap-for-commercial-acceptance-of-floating-lidar>.
- [14] Gottschall J, Wolken-Möhlmann G, Viergutz T, et al. Results and conclusions of a floating-lidar offshore test[J]. *Energy Procedia*, 2014, 53: 156-161.
- [15] Hsuan C Y, Tasi Y S, Ke J H, et al. Validation and measurements of floating LiDAR for nearshore wind resource assessment application[J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 1699-1702.
- [16] Gutiérrez-Antuñano M A, Tiana-Alsina J, Rocadenbosch F, et al. A wind-lidar buoy for offshore wind measurements: first commissioning test-phase results[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 23-28, 2017, Fort Worth, TX, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1607-1610.
- [17] 黄小祥, 陶英佳, 官明开. 海上风电漂浮式激光雷达测风发展研究[J]. *中国水运*, 2019, 19(10): 57-58. Huang X X, Tao Y J, Guan M K. Research on the development of floating lidar wind measurement for offshore wind power[J]. *China Water Transport*, 2019, 19(10): 57-58.
- [18] Browning K A, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1968, 7(1): 105-113.
- [19] 王贵宁, 刘秉义, 冯长中, 等. 相干测风激光雷达 VAD 风场反演的数据质量控制方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 0230002. Wang G N, Liu B Y, Feng C Z, et al. Data quality control method for VAD wind field retrieval based on coherent wind lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0230002.
- [20] 曾书儿. 风速风向的矢量平均方法[J]. *气象*, 1983, 9(6): 21-22. Zeng S E. The vector mean method of wind[J]. *Meteorological Monthly*, 1983, 9(6): 21-22.