

无人机电载多普勒激光雷达海上风场观测及数据处理

王琪超¹, 吴松华^{1,2*}, 张洪玮¹, 刘秉义^{1,2}, 张凯临¹

(1. 中国海洋大学海洋高等研究院信息科学与工程学院海洋遥感研究所, 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)

摘要:介绍了中国海洋大学激光雷达团队的小型化机载多普勒激光雷达系统研制工作、机载运动状态下的姿态及速度校正算法和海上风场反演方法。分析了2016年在广东省海陵岛近岸海域开展的国内首次无人直升机载激光雷达海上风场观测实验的数据,并与陆基多普勒激光雷达观测结果进行了对比,验证了系统的工作性能及数据反演算法的有效性。实验结果表明,机载多普勒激光雷达系统运动状态下的观测数据与陆基激光雷达观测数据相关性较好,系统可搭载于小型无人机平台,有效实现海上风场的快速精确观测。

关键词:多普勒激光雷达;机载;海上风场;运动补偿

中图分类号: TN958.;98

文献标识码: A

Observation and data processing of offshore wind field based on UAV-borne Doppler lidar

WANG Qi-Chao¹, WU Song-Hua^{1,2*}, ZHANG Hong-Wei¹, LIU Bing-Yi^{1,2}, ZHANG Kai-Lin¹

(1. Institute for Advanced Ocean Study, College of Information Science and Engineering, Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: A compact airborne coherent Doppler lidar (ACDL) was developed by Ocean University of China. The system design, methods of motion compensation, velocity correction and wind inversion have been explained in this paper. The data analyzed in this paper are based on the first domestic UAV-borne Doppler lidar experiment for offshore wind at Hailing Island, Guangdong Province in 2016. The reliability of correction and inversion algorithms have been proved with ground-based Doppler lidar. ACDL has been proved to be an effective tool to achieve offshore wind observation.

Key words: Doppler lidar, airborne, offshore wind, motion compensation

引言

海气边界层是连接海洋与大气的界面,风场作为一种重要的海气边界层动力学参数,对于海洋中动量、能量与物质输运十分重要。海上风场的精确、快速、大范围测量对于海洋动力学预测模型、海气相互作用、海气通量的研究,海事活动的保障以

及海洋风能资源的开发具有重要意义。

目前的海上风场测量主要有以下几种方式:固定式海上测风塔、无线电探空仪、船载微波雷达、船载多普勒激光雷达等。固定式测风塔为原位探测,由于工程结构的复杂性只能在浅海建造,建设成本较大,无法更换观测区域且测量高度较低;无线电探空仪对大气风场的测量受探空气球施放频率限

收稿日期:2020-09-21,修回日期:2021-01-06

Received date:2020-09-21, Revised date:2021-01-06

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1408001, 2019YFC1408002),国家自然科学基金(61975191)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China (2019YFC1408001, 2019YFC1408002), National Natural Science Foundation of China (61975191)

作者简介(Biography):王琪超(1989-),男,山东莱阳人,博士研究生,主要从事相干多普勒测风激光雷达、基于动平台的激光雷达测风技术研究。E-mail: wqc@stu.ouc.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: wush@ouc.edu.cn

制,目前多以早晚各一次的方式进行大气剖面探测,数据获取率较低;微波雷达观测尺度较大,且易受海杂波影响,近海面区域风场观测能力较差,晴空条件下测量能力较低。多普勒激光雷达为非接触式测量,接收出射激光波束遇到大气中气溶胶粒子后产生的回波信号,通过回波信号中的多普勒频移,能够获取激光波束方向上的大气运动信息,结合光开关或伺服扫描方式,能够实现对大气三维风场的测量,具有大观测范围、高时空分辨率、高测量精度等特点,且具备晴空探测能力,是一种有效的海上风场探测手段。

自1970年第一台CO₂多普勒激光雷达研制以来^[1],多普勒激光雷达技术得到了高速的发展,按探测方式区分,可分为相干与非相干多普勒激光雷达,按发射激光的特征区分,可分为脉冲与连续波多普勒激光雷达。相较于非相干多普勒激光雷达,相干多普勒激光雷达体积小、重量轻且空间分辨率高,更易实现业务化观测及应用;相较于连续波激光雷达,脉冲多普勒激光雷达测量范围更大,空间分辨率稳定且具备同一时刻垂直廓线的探测能力,应用场景更为丰富。随着1980年光纤激光器的出现^[2],体积更小、重量更轻的窄线宽光纤相干多普勒激光雷达成为研究的焦点,法国Leosphere公司、中国科学院上海光学精密机械研究所、西南技术物理研究所、中国海洋大学等单位均成功研制了陆基全光纤相干多普勒激光雷达,目前相关技术已广泛应用在环境气象监测、机场风切变预警、飞机尾涡探测、风电场风资源勘测及风机尾流监测等领域^[3-8]。

随着多普勒激光雷达技术的逐步成熟和广泛应用,针对可移动平台搭载多普勒激光雷达系统的研究越来越受到关注,包括各类车载、船载、机载多普勒激光雷达等。相对于车载及船载激光雷达,机载多普勒激光雷达移动速度更快、范围覆盖更大,对海上风场及陆上风场均可进行观测,具备一定的优势,可以提高偏远地区及海上区域的气象探测和数据同化能力^[9]。1981年和1984年,美国NASA开展了10.6 μm多普勒激光雷达的机载风场观测试验^[10-12];2002年,美国NAVY研制了波长为2 μm的机载相干多普勒激光雷达TODWL(Twin Otter Doppler Wind Lidar)^[13-14];2005年,德国DLR研制了星载多普勒激光雷达卫星ADM-Aeolus上所搭载ALADIN的机载原型A2D,至今已开展了多次飞行观测实验^[15-18];2009年,日本JAXA研制了观测大气湍流

的机载多普勒激光雷达系统^[19-20];同年,美国NASA将TWiLiTE(The Tropospheric Wind Lidar Technology Experiment)项目研制的一款波长为355 nm的机载直接探测多普勒激光雷达集成在ER-2高空侦察机上完成了验证飞行,该系统于2015年与DLR猎鹰搭载的A2D开展了联合实验^[18,21-22];2012年,美国GSFC研制了波长为532 nm的机载多普勒激光雷达ACATS,在2012年、2014年完成了数次科学飞行实验^[23-24];2016年,美国环境科学合作研究所研制的波长为532 nm的GrOAWL(Green Optical Covariance Wind Lidar)机载多普勒激光雷达搭载于NASA的WB-57试验飞机开展了飞行观测^[25-26]。目前,国内开展机载多普勒激光雷达研究的单位较少,2011年,西南技术物理研究所等单位针对机载多普勒测风激光雷达的原理、系统组成及应用领域进行了研究^[27];2016年,中国科学院上海光学精密机械研究所研制了机载全固态多普勒测风激光雷达并进行了试验飞行,并对风场反演方法进行了研究^[28-30]。

中国海洋大学激光雷达实验室于2016年研制了一款机载脉冲相干多普勒激光雷达(Airborne Coherent Doppler Lidar,简称ACDL),系统采用全光纤模块化设计,具备小型化、低功耗等特点^[31-32]。系统研制完成后搭载于Z-5型无人直升机,在广东省阳江市海陵岛区域开展了国内首次无人直升机载激光雷达海上观测试验,基于自主开发的姿态、速度校正算法及风场反演方法,实现了观测海域范围内的大气风场反演及数据分析。

1 机载激光雷达系统

中国海洋大学研制的机载多普勒激光雷达主要搭载平台为无人直升机、小型固定翼飞机等,针对平台特征,系统主要研制方向为小型化、轻量化、低功耗,并具备一定的抗振性能。系统基于脉冲相干多普勒激光雷达技术,采用了全光纤模块化设计以保证其稳定性和可靠性。激光雷达主要由激光发射单元、扫描伺服单元、光学接收单元、数据采集与处理单元组成,系统原理图及结构示意图如图1所示,主要参数见表1。

1.1 光电结构

系统采用了高集成度的1.55 μm光纤激光器作为种子光源,线宽为10 kHz,种子激光通过分束器一分为二,一束作为本振光进入2*2光学耦合器,另一束作为出射光,利用声光调制器(Acoustic Optical Modulator,简称AOM)实现80 MHz的移频,并通过

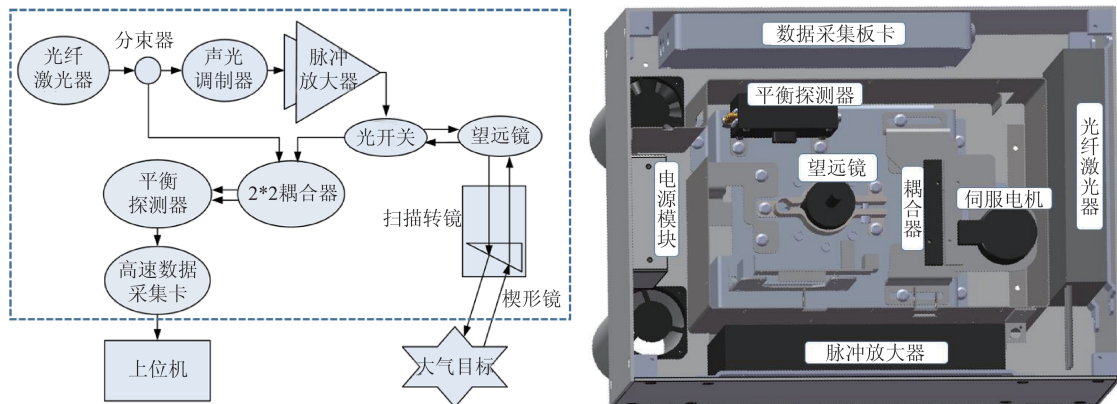


图1 机载相干多普勒激光雷达系统原理图及内部结构示意图

Fig. 1 Schematic and structure diagram of the airborne coherent Doppler lidar system

脉冲功率放大器 (Master Oscillator Power-Amplifier, 简称 MOPA) 进行能量放大后经由光开关控制进入望远镜, 脉冲能量达到 $100 \mu\text{J}$, 脉冲重复频率为 10 kHz , 调制产生的脉冲宽度为 200 ns , 对应的径向空间分辨率为 30 m 。激光雷达的发射和接收窗口位于无人机导流罩外, 系统采用了收发一体的望远镜, 直径为 100 mm , 通过非球面透镜消除远场的像差, 增加了后向散射信号的接收能力, 望远镜筒长度为 425 mm , 内置楔形镜, 出射光经光纤进入望远镜后利用楔形镜完成 30° 的角度偏转。镜筒使用交叉滚子轴承与支架连接, 由步进电机通过同步带驱动旋转, 镜筒的旋转角度由角度编码器实时测量反馈。通过驱动望远镜筒及楔形镜的转动, 机载激光雷达可以实现对大气风场的三维扫描观测, 出射激光遇到大气中的气溶胶粒子产生的后向散射信号经望远镜进入光学接收系统, 经过光学环形器后进入 2×2 光学耦合器, 与本振光耦合, 进入平衡探测器进行鉴频, 利用外差检测技术得到回波信号与本振光之间的频率差, 即为激光径向方向上激光雷达系统与大气相对运动引起的多普勒频移信息。利用现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, 简称 FPGA) 信号处理器, 对激光雷达信号进行数字化采集和基于快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, 简称 FFT) 的实时分析。根据频移量、激光波长、速度之间的关系, 可以得到激光雷达径向方向上各距离库内的风速信息, 通过矢量计算, 即可获得大气风场的三维信息。同时, 信号处理单元扩展了系统的电源控制、工作状态检测、转镜电机交互通信、调姿系统通信等功能, 实现了系统整机的控制。

为降低激光雷达体积及重量, 机载激光雷达系

统内部未内置上位机, 通过串口及网络实现与电脑的外接, 进行系统的观测控制及数据的传输。

1.2 机械结构

机载激光雷达的机械结构主要采用铝镁合金材料, 强度高、密度小, 能够实现机载系统的轻量化, 材料耐腐蚀性强, 能够有效保护系统内部的精密光电结构, 提升了其在海上应用时的环境适应性。为实现小型化及低功耗, 机载激光雷达未安装常用的空调模块进行温度控制, 为防止种子激光器及脉冲放大器的高温导致系统工作异常, 系统内部结构设计了单循环风道, 采用两个尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的散热风扇作为进气扇及出气扇, 通过两个长度为 260 mm 的通风管实现激光雷达在无人机机腹外的气流交换, 配合激光器固定位置的散热片结构铝合金外壳, 实现系统的内部散热, 如图 2 所示。机载激光雷达底座通过 6 个载荷为 50 N 的空气阻尼式隔振器转接固定在飞机内部的支架上, 以降低飞机飞行时引起的系统振动, 避免对激光雷达系统的正常工作产生影响。

2 数据校正及反演方法

激光雷达对大气速度的观测基于多普勒原理, 各径向各距离库回波信号中的频移量与相对运动速度的关系对应如下:

$$f_d = \frac{2V \times \cos\gamma}{\lambda} = \frac{2V_{\text{los}}}{\lambda} \quad (1)$$

其中 f_d 为多普勒频移, λ 为激光波长, V_{los} 为激光径向距离库上的相对运动速度。对于出射光源为 $1.55 \mu\text{m}$ 的激光雷达系统, 每 1 MHz 的多普勒频移对应的相对运动速度约为 0.78 m/s 。本文定义径向上的风远离激光雷达系统时为正值, 此时对应的多普勒频

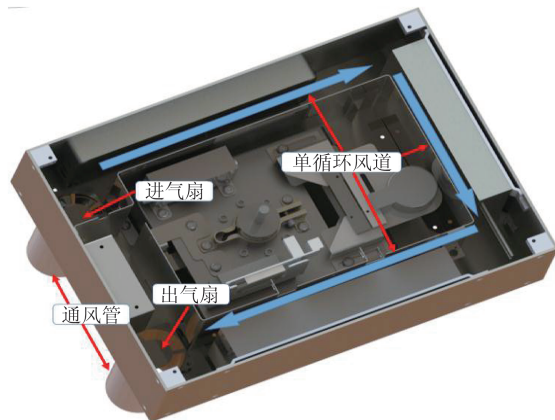


图2 机载相干多普勒激光雷达系统散热结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat-removal system

表1 机载相干多普勒激光雷达主要系统参数

Table 1 Specifications of the airborne coherent Doppler lidar

指标	具体参数
激光波长	1.5 μm
脉冲能量	100 μJ
脉冲宽度	200 ns
脉冲重复频率	10 kHz
径向距离分辨率	30 m
测量高度范围	30~3000 m
风速测量范围	± 60 m/s
功耗	90 W
重量	23.2 kg
尺寸	460 mm \times 370 mm \times 270 mm
人眼安全标准	EN60825-1:2007

*注:风速的正负号指示风运动的方向,“+”代表风朝远离激光雷达的方向运动,“-”代表风朝靠近激光雷达的方向运动

移为负值;径向上的风靠近激光雷达时为负值,此时对应的多普勒频移为正值。因此,在利用公式计算径向风速信息时需要乘以-1。通过多个激光径向上同一距离库的径向速度信息和空间角度信息即可进行矢量合成,获得大气风场信息。

相对于固定式的多普勒激光雷达,本文所描述的机载多普勒激光雷达系统及搭载系统的飞机平台处于高速运动的状态,运动速度通常远大于大气风场,自身运动引起的多普勒频移也较大;除此之外,飞机的飞行高度、飞行方向、飞行姿态也会导致激光雷达观测区域的变化,在观测到的数据中引入不断变化的误差。为了获取真实的大气风场信息,必须精确计算并校正飞机平台运动引起的观测误差^[33-35]。本文通过搭载在激光雷达系统上部的双天线全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite



System,简称GNSS)和惯性参考系统(Inertial Reference System,简称IRS)作为机载多普勒激光雷达的运动测量系统,可以获得系统的高度、运动速度、地理位置(包括地球坐标系ECS中的经度和纬度)以及系统的偏航角、俯仰角及翻滚角信息。基于GNSS和IRS系统获得的姿态及运动参数信息(见表2),即可通过姿态及速度校正算法对飞机平台运动引入的风速观测误差进行计算和校正。

表2 机载相干多普勒激光雷达姿态及运动参数

Table 2 Attitude and motion parameters of the airborne coherent Doppler lidar

a. 翻滚角 α (IRS)	b. 俯仰角 β (IRS)	c. 航向角 γ (IRS)
d. 纬度 (GPS)	e. 经度 (GPS)	f. 海拔高度 (GPS)
g. 前向速度 (IRS)	h. 横向速度 (IRS)	i. 垂向速度 (IRS)

表2中,a,b及c为机载多普勒激光雷达的姿态信息,用于计算激光雷达各径向在地理坐标系下的指向信息;经纬度数据(d,e)用于提供观测区域的真实地理坐标;海拔高度f用于定位机载激光雷达各径向各距离库的真实海拔高度;g,h和f为机载激光雷达的三轴运动速度,通过结合各径向在地理坐标系下的真实指向,校正机载多普勒激光雷达的自身运动引入的风场观测误差。

2.1 扫描观测模式

机载激光雷达采用向下逆时针圆锥扫描的模式实现对大气风场的观测,由于楔形镜 30° 的光束偏转,各径向相对于激光雷达本身的固定夹角为 60° 。不同于陆基激光雷达进行风廓线测量时常采用的DBS四波束(径向方位角间隔 90°)观测模式,综合考虑多径向加密观测需求及无人机的高速移

动特性下观测区域的一致性需求,机载激光雷达各径向的方位角间隔设计为 75° ,间隔时间约 1.8 s ,在每个圆锥扫描周期较短的前提下,实现扫描圆周内的多径向覆盖观测。

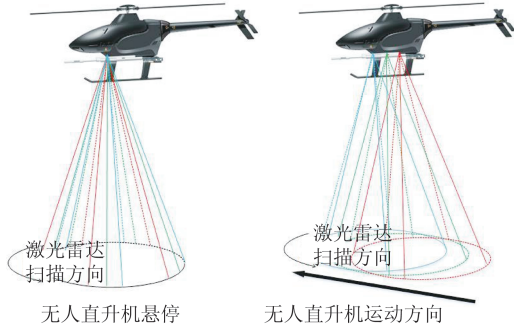


图3 机载相干多普勒激光雷达观测模式

Fig. 3 Observation modes of the airborne coherent Doppler lidar

如图3所示,机载激光雷达采用 75° 间隔的扫描方式,可以实现扫描圆锥内多个不重叠方向上的径向风速观测,更准确的实现大气风场的反演。图3(a)所示为机载激光雷达悬停观测时多个扫描周期内的观测示意图,红色线代表第一个周期内的激光径向,绿色线代表第二个扫描周期,蓝色线代表第三个扫描周期,机载激光雷达悬停观测时,扫描观测的圆锥范围一致,但每个扫描周期内的径向方向并不重叠,间隔为 15° ;图3(b)所示为机载激光雷达走航观测示意图,当走航观测时,每5个激光径向(时间约 9 s)即可实现一个椭圆锥范围内的扫描,在满足扫描速度的前提下,尽可能保障观测区域的一致性。

基于机载多普勒激光雷达的扫描模式,系统观测数据的主要反演方法分为以下三个流程:确定各激光径向在地理坐标系下的真实指向信息、校正各径向各距离库观测数据内由飞机平台运动引入的误差、反演各海拔高度上的大气风场信息。

2.2 姿态校正算法

在飞机平台移动的过程中,通过飞机与激光雷达在地理坐标系中的速度及姿态信息和激光雷达各径向在飞机平台坐标系中的指向信息可以实时计算地理坐标系中各激光径向的真实指向,其中地理坐标系的定义如下: X 轴指向北, Y 轴指向东, Z 轴指向地面;飞机平台坐标系的定义如下: X_0 轴指向无人机平台的前部, Y_0 轴指向无人机平台的右侧, Z_0 轴指向底部。

在飞机平台坐标系中,发射激光的方位角和俯仰角分别为 φ_0 和 θ_0 。 φ_0 定义为发射激光在 X_0 - Y_0 平面上的投影与 X_0 正轴之间的夹角。当向下看时,沿顺时针方向增加。 θ_0 定义为发射激光与 X_0 - Y_0 平面之间的夹角。因此,飞机平台坐标系中发射激光的方向可以用单位矢量表示为:

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_0 \cos\varphi_0 \\ \cos\theta_0 \sin\varphi_0 \\ -\sin\theta_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

飞机平台在地理坐标系下的姿态可以用翻滚角,俯仰角和航向角表示。翻滚角 α 、俯仰角 β 和航向角 γ 分别定义为绕 X 、 Y 和 Z 轴的旋转。因此,在地理坐标系中发射激光方向的单位矢量 \mathbf{r} 可以表示为:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (\mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2 \mathbf{H}_3)^{-1} \mathbf{r}_0 \quad (3)$$

其中, \mathbf{H}_1 、 \mathbf{H}_2 和 \mathbf{H}_3 分别是翻滚、俯仰和航向的旋转矩阵,如下所示:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}$$

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

$$\mathbf{H}_3 = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

一旦单位向量 \mathbf{r} 由等式计算出来,即可计算出地理坐标系中各激光径向的方位角 φ 和俯仰角 θ :

$$\varphi = \arctan(y/x) \quad (5)$$

$$\theta = -\arcsin z \quad (6)$$

由此即可获得飞机平台走航测量期间,机载多普勒激光雷达各径向在地理坐标系中的真实指向,为下一步开展速度校正及风场反演提供准确数据。

图4为机载多普勒激光雷达在地理坐标系下的姿态信息序列,包括图4(a)翻滚角 α 、图4(b)俯仰角 β 、图4(c)航向角 γ ,横轴为采样序列;图5为姿态校正前后的机载激光雷达径向指向角度信息序列,校正前激光雷达记录的飞机坐标系中各径向方位角 φ_0 及俯仰角 θ_0 以黑色表示,其中俯仰角 θ_0 固定为 -60° ,经过姿态校正后,地理坐标系下各径向的方位角 φ 和俯仰角 θ 以红色表示。通过图5可以看出,校

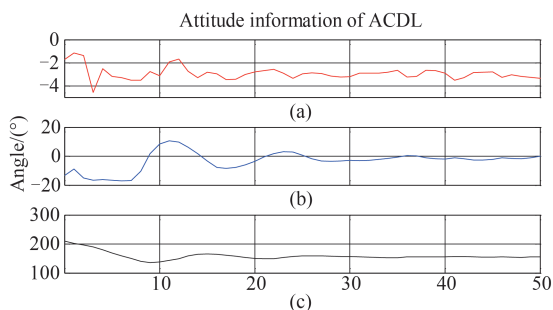


图4 机载多普勒激光雷达姿态信息

Fig. 4 Attitude information of the airborne coherent Doppler lidar

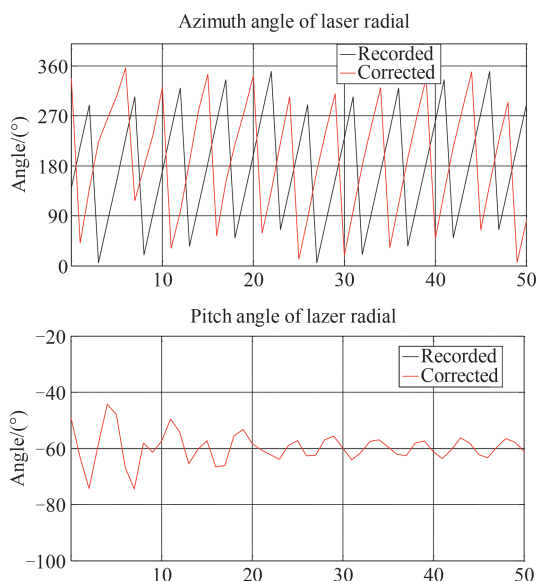


图5 机载激光雷达径向指向角度校正

Fig. 5 Correction of airborne coherent Doppler lidar radial pointing angle

正前后的激光径向指向存在较大差异。

2.3 速度校正算法

机载多普勒激光雷达观测到的各径向上各距离库的径向速度 v_m 可以从系统存储的谱数据中进行提取,其中包含由真实大气风场运动引起的径向风速 v_r 和由系统随飞机平台运动引起的径向速度 v_e 。

机载多普勒激光雷达随飞机平台运动引入的误差可通过两种方法进行实时的校正:1. 地面硬靶数据校正;2. 机载激光雷达运动速度校正。

1. 地面硬靶数据校正:机载多普勒激光雷达向下观测时,各激光径向在地面至飞机高度内不同距离库的回波信号会包含大气风场运动和系统运动引起的多普勒频移信息,而在对应地面位置的距离库内,回波信号中不包含大气运动信息,该距离库

内的多普勒频移均由系统与地面的相对运动引起。同一径向上不同距离库内系统运动引起的多普勒频移量相等,在各距离库内减去对应地面位置距离库的频移信息,即可得出由大气运动引起的多普勒频移,进而获得真实的径向速度 v_r 。

2. 机载激光雷达运动速度校正:机载激光雷达随飞机平台的运动信息可以分为地理坐标系下的前向运动、侧向运动和垂向运动,其速度信息均可通过搭载的GNSS及IRS获得,结合各激光径向在地理坐标系下的方位角及俯仰角信息进行矢量分解,即可获得由机载激光雷达运动在各径向上引起的速度分量 v_e 。通过系统各径向各距离库所观测到的相对速度信息 v_m 并校正掉无人机运动在各径向上引起的速度分量 v_e ,即可获得大气运动引起的真实径向速度 v_r 。

由于本次大气观测实验目标为海上风场,存在海流、海浪等干扰因素,海面回波无法作为零速硬靶数据代入径向速度校正,因此本文采用了机载激光雷达运动速度校正的方法,具体校正及反演流程如图6所示。

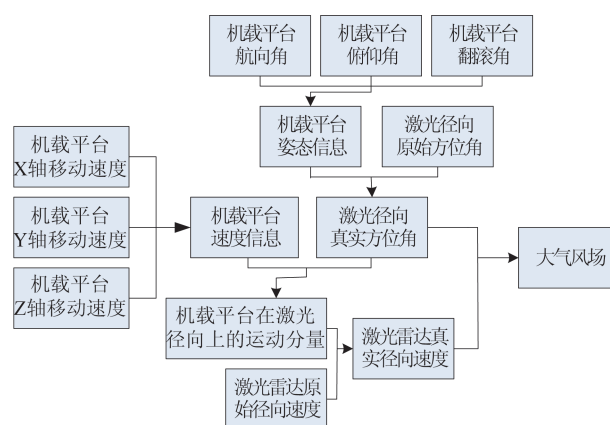


图6 机载激光雷达径向速度校正流程图

Fig. 6 Flow diagram of airborne coherent Doppler lidar radial velocity correction

为获取机载激光雷达的高速运动信息及其引起的观测误差,机载激光雷达搭载于飞机平台进行了实验测试,采集了机载激光雷达在一个完整架次中的三轴移动速度:前向速度(图7(a))、横向速度(图7(b))、垂向速度(图7(c))。飞行期间,飞机平台最大移动速度约30m/s,计算获得移动速度在各激光径向上引入的观测误差如图7(d)所示,在单一径向上,各距离库处由系统运动引入的误差是一致的,按时间序列呈正弦分布,通过对其校正即可获

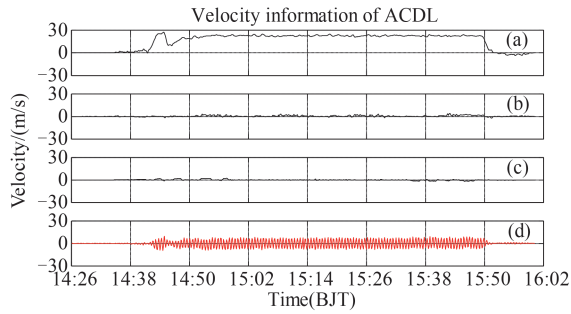


图7 机载激光雷达运动速度信息

Fig. 7 Velocity information of airborne coherent Doppler lidar

得由大气运动引起的真实径向速度。

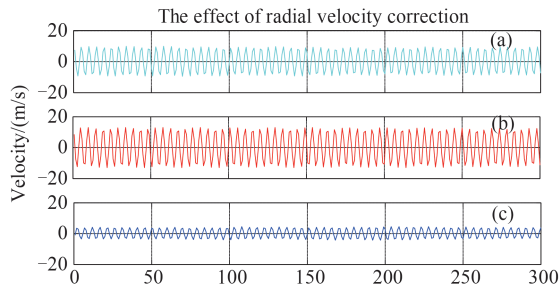


图8 机载激光雷达径向速度校正效果图

Fig. 8 Velocity information of airborne coherent Doppler lidar

图8所示为各激光径向在10 min内的径向速度校正效果,图8(a)为激光雷达各径向在同一距离库处观测到的原始径向速度 v_{re} ,图8(b)为机载激光雷达随飞机平台运动在各径向上引起的速度分量 v_e , v_{re} 校正掉 v_e 可获得图8(c)大气风场在激光雷达各径向上的速度分量 v_r ,当风速较低且机载激光雷达处于高速移动状态下,激光雷达观测到的径向速度大部分为自身随飞机平台运动引入的观测误差。

运动姿态及系统移动速度信息的获取及姿态和速度校正算法的应用,能够校正由机载激光雷达系统运动、姿态变化引起的一系列指向及数据观测误差,提供从近地面/海面至机腹下方区域的真实径向数据,进一步开展大气风场的反演。

2.4 风场反演方法

脉冲相干多普勒激光雷达的径向距离分辨率受激光发射信号的脉冲宽度影响,各径向上同一距离库与设备之间的距离是一致的。通常在陆基布放时,激光雷达系统会通过水平布放来实现各径向上同一距离库在海拔高度上的一致性,保障后续风场反演的精度。机载激光雷达观测时受飞机姿态影

响,系统处于非水平状态,各径向与水平方向的夹角存在差异,同一距离库的海拔高度并不一致,在风场反演时无法使用同一距离库数据直接矢量合成。同时,受飞机平台飞行高度变化的影响,各距离库对应的海拔高度也在不断变化。要保证风场的精确反演,首先需要通过飞机平台飞行高度 H_{ap} 及各径向俯仰角 θ 信息,计算各距离库真实海拔高度 H_N ,并结合径向速度 v_r 进行等高度插值。

本文所研制的机载多普勒激光雷达脉宽为200 ns,对应的径向距离分辨率为30 m,各距离库距离系统的距离为 $N*30$ m, N 代表距离库在径向上距离系统的个数。由此,第 N 个距离库对应的真实海拔高度为

$$H_N = H_{ap} - (N*30 * \sin(2\pi - \theta)) \quad (7)$$

基于各距离库的径向速度及真实海拔高度,对各个激光径向进行等海拔高度插值后,即可获得在同一海拔高度处大气运动在不同径向上引起的速度分量。

多普勒激光雷达的大气风场反演基于观测周期内的大气均匀假设,通常采用DBS四波束合成或VAD方法计算风速及风向,由于机载多普勒激光雷达采用 75° 间隔的圆锥扫描方式,且各激光径向在地理坐标系下的俯仰角存在差异,本文采用矢量合成的方式进行风场反演。

假设机载多普勒激光雷达在相同海拔高度处观测范围内的局部风场是水平均匀的,风速在各激光径向上引起的速度分量如下:

$$v_r = u \cdot \cos\varphi \cdot \cos\theta + v \cdot \sin\varphi \cdot \cos\theta + w \cdot \sin(2\pi - \theta) \quad (8)$$

其中 v_r 是径向速度, u 、 v 、 w 分别是大气风场的北向、东向和垂向速度, φ 是激光径向在地理坐标系中的方位角, θ 是激光径向的俯仰角。通过滑动代入多个连续激光径向在地理坐标系中的方位角、俯仰角及插值后在同一海拔高度处大气运动引起的径向速度,即可解出各海拔高度处的 u 、 v 、 w ,从而获得包括风向、风速在内的精确风场数据,秒级风廓线的更新频率与径向间隔(约1.8 s)相关。

3 海上实验及数据分析

机载多普勒激光雷达研制完成后,集成在以Z-5型无人直升机(主要参数见表3)为平台的船载无人机海洋观测系统中,通过机腹窗口向下开展风场观测,如图9所示。激光雷达由无人直升机供电,观测数据集成至无人机搭载的电台,地面的操作指令



图9 船载无人机海洋观测系统

Fig. 9 Shipborne UAV ocean observation system

集成至测控车,二者以无线电信号交互,实现激光雷达数据的实时传输、显示及设备的远程控制。船载无人机海洋观测系统在安徽明光开展了前期的测试性实验,完成了系统集成及远程通讯测试,电磁型兼容性测试等,并进行了系泊飞行和低空飞行测试,验证了系统的稳定性。

表3 Z-5型无人直升机主要参数

Table 3 Specifications of the Z-5 unmanned helicopter

指标	具体参数
最大飞行高度	≥ 3500 m
巡航半径	≥ 100 km
抗风能力	6级
续航能力	4 h
载荷能力	50 kg
数据传输能力	实时数据传输速率4 Mbps

2016年12月,团队在广东省阳江市海陵岛开展了船载无人机海洋观测系统的海上风场观测实验,飞行观测次数共十余次,单次观测时间1~1.5 h,起飞时间包含上午、中午及傍晚等不同时间段。实验期间,对海陵岛沿岸海上风场、南鹏岛区域海上风场、海陵岛南部海域风场进行了观测,考虑到人员及设备安全性问题,此次飞行实验均远离岸上人员聚集区域。

受空域限制,观测实验在图10所示的白框区域内进行,无人机起降位置位于S点,主要包括以下三条航线:

航线1:沿岸航线,观测海陵岛沿岸区域风场信息,以黄线标识,航线轨迹S-A1-A2-A3-A4-A5-A1-S;

航线2:海岛航线,观测海陵岛东南处南鹏岛区域海上风场,以绿线标识,航线轨迹S-B1-B2-B3-B4-B5-B1-S;

航线3:近海航线,观测海陵岛南部海域海上风

场及海气边界层信息,以红线标识,航线轨迹S-C1-C2-S。

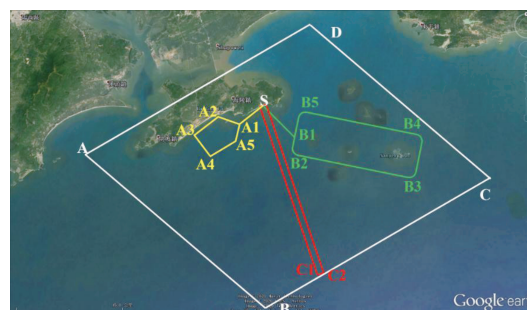


图10 海上实验区域及航线设计

Fig. 10 Experimental area and route design

实验期间,在海陵岛无人直升机起降区域S点处布放了一台陆基相干多普勒激光雷达(Ground-based Coherent Doppler Lidar,简称GCDL),用于无人机起降阶段的气象保障及机载激光雷达观测数据的对比印证,GCDL主要参数见表4。

表4 陆基相干多普勒激光雷达主要参数

Table 4 Specifications of the ground-based coherent Doppler lidar

指标	具体参数
激光波长	1.5 μ m
脉冲能量	160 μ J
脉冲宽度	100/200 ns 可调
脉冲重复频率	10 kHz
径向距离分辨率	15/30 m 可调
测量范围	100~3000 m
数据刷新率	1~10 Hz
风速测量范围	± 37.5 m/s
风速测量精度	0.1 m/s

机载激光雷达观测数据经姿态及速度校正、高度插值、风场反演后可获得随海拔高度变化的风廓线,包括风速及风向信息,通过将风廓线绘制为THI(Time-Height-Intensity)图,可以得到观测架次内的完整风场信息,便于分析观测周期内随时间变化发生的风场演化。部分实验架次观测到的THI图如下所示,横轴为时间,纵轴为海拔高度,颜色深浅代表风速、风向的大小,实验期间,机载激光雷达观测到的典型海上风场数据特征如表5所示。

图11为2016年11月20日观测到的海陵岛沿岸风场THI图,图11(a)为水平风速,图11(b)为风向。船载无人机海洋观测系统沿航线1对海陵岛南

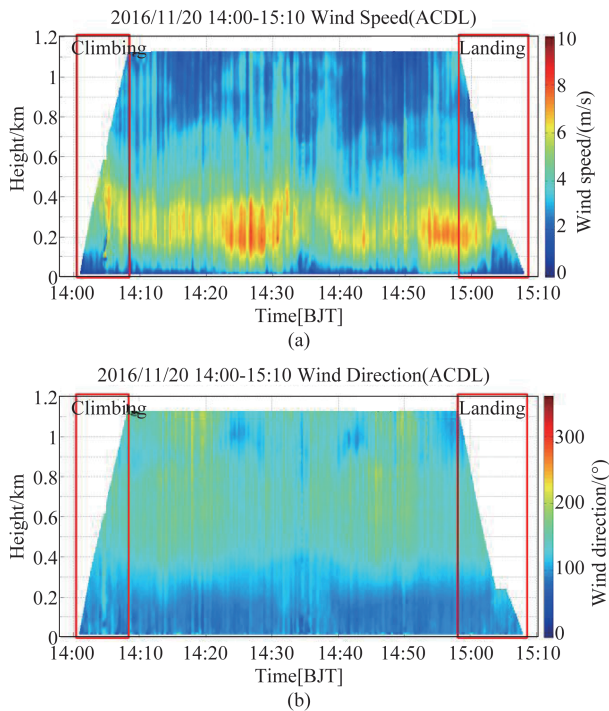


图 11 2016年11月20日机载激光雷达观测到的风场THI图
Fig. 11 Wind THI diagram obtained by ACDL on 2016.11.20

岸连续观测两次,最大飞行高度约为1200 m,最远距离S-A4为10.8 km。THI图中左右两侧上方数据的缺失与无人直升机起飞和降落阶段高度的变化有关。有效风场数据的海拔高度范围为海拔30 m至海拔1 140 m,受激光脉冲空间展宽影响,机载激光雷达的观测盲区为机腹下方60 m及海面上方30 m区域。观测区域内的水平风速在垂直高度上存在明显的变化,近海面处受海面及海岸下垫面摩擦力影响,风速普遍较低,随高度的增加,水平风速逐渐增强,在100~400 m高度范围内出现高风速带,风速最大值达到9.8 m/s,随着高度的进一步增加,水平风速又逐渐减弱;400 m高度以下,风向以东风为主,400~1 140 m高度内,风向以南风和东南风为主。

图12为2016年12月17日沿航线2观测到的南鹏岛海域风场THI图,图12(a)为水平风速,图12(b)为风向。南鹏岛位于海陵岛东南侧,岛上海拔最高点为191.5 m。无人机最大飞行高度1 200 m,最远距离S-B3为23.8 km。观测期间,700 m高度以下的风向以东风为主,700~1 140 m高度范围内以东南风为主,海面至700 m高度范围内以海拔700~1 100 m高度范围内存在高风速带,14:10分-14:45分,无人机沿S-B1-B2-B3走航观测,此时观测到的风速最大值为8.3 m/s。14:45分-15:30分,无人机

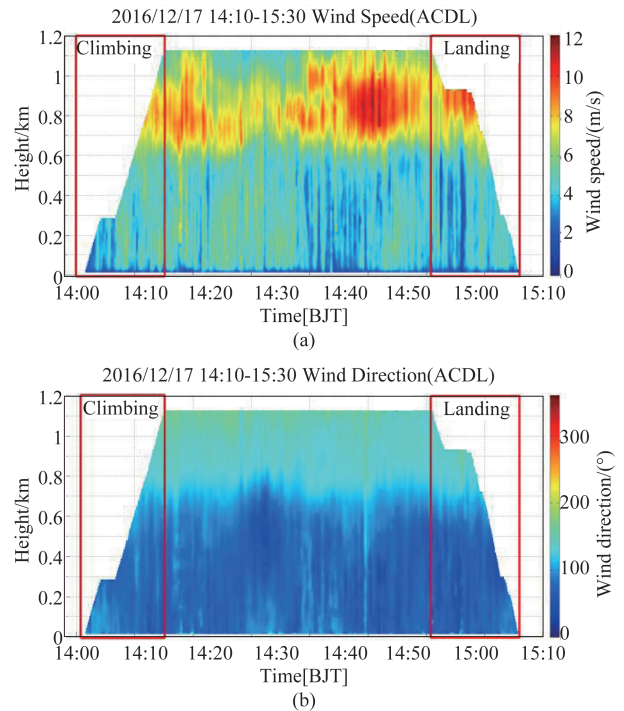


图 12 2016年12月17日机载激光雷达观测到的风场THI图
Fig. 12 Wind THI diagram obtained by ACDL on 2016.12.17

沿B3-B4-B5-B1-S走航观测,高风速带风速有明显增强后减弱的迹象,最大风速达11.9 m/s。结合风向判断,观测期间,700~1 100 m高度范围内有高速气团经南鹏岛上空吹向海陵岛区域,经岛体地形影响,风速大小在下风向区域内有一定的下降。

图13为2016年12月18日沿航线3观测到的海陵岛南部近海风场THI图,观测目标为不受海岸及岛屿影响的海上风场信息,图13(a)为水平风速,图13(b)为风向。无人机连续往返观测两次,最大飞行高度约1 200 m,受限于空域管制,最远飞行距离S-C1为25.5 km,其中16:03分、16:35分左右,观测区域位于C1、C2点附近,此时与起飞位置S点之间的距离为最大值。从图中可以看出,随着观测区域逐渐远离海岸,低空近海面区域风速不断增大,风速在海面70~1 000 m高度内均接近10 m/s,无人机往返飞行时经过同一区域时,大气结构较为稳定,短时间内大气风场未发生较大变化,风速略有增强,能够观测到较为明显的前后对称迹象,观测期间风向较为稳定,以东风及东南风为主。

图14为2016年12月19日机载多普勒激光雷达沿航线3往返飞行观测到的风场THI图,图14(a)为水平风速,图14(b)为风向,观测时间内大气风场的垂直结构较为稳定,在400~1 000 m海拔高度范围内出现高风速带,水平风速普遍>10 m/s,随时间

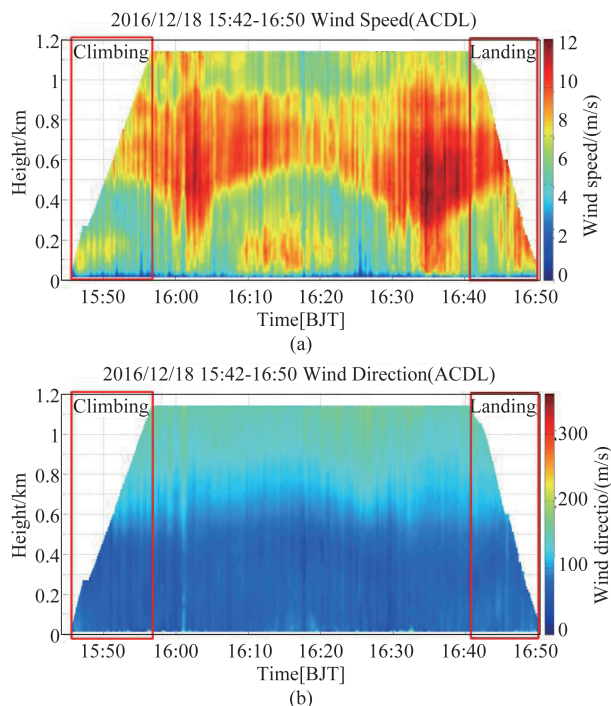


图 13 2016 年 12 月 18 日机载激光雷达观测到的风场 THI 图
Fig. 13 Wind THI diagram obtained by ACDL on 2016.12.18

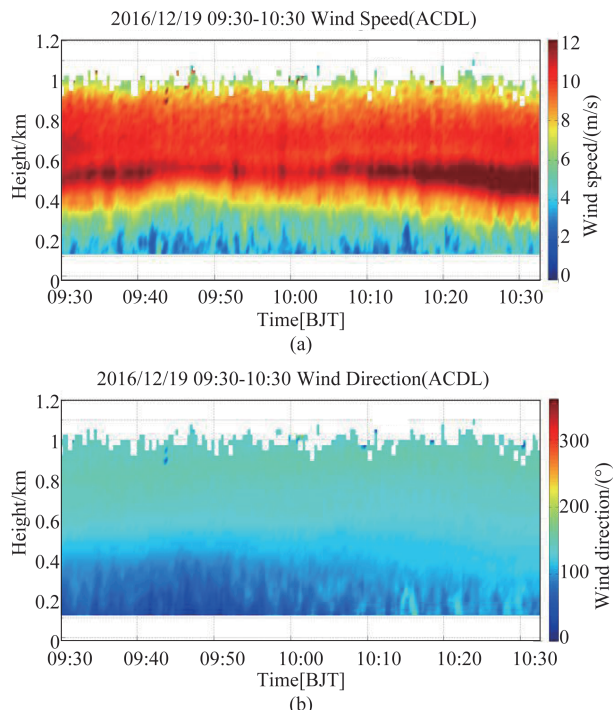


图 15 2016 年 12 月 19 日陆基激光雷达观测到的风场 THI 图
Fig. 15 Wind THI diagram obtained by GCDL on 2016.12.19

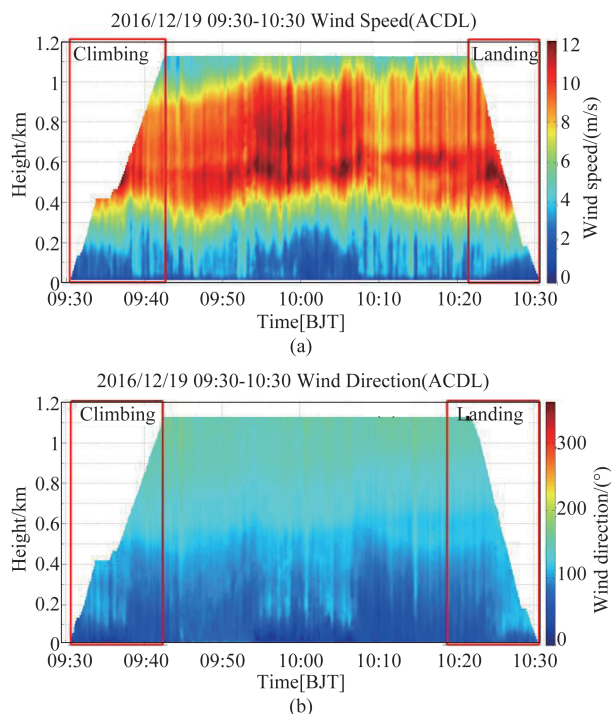


图 14 2016 年 12 月 19 日机载激光雷达观测到的风场 THI 图
Fig. 14 Wind THI diagram obtained by ACDL on 2016.12.19

推移, 风速略有增强, 风向沿海拔从低到高逐步由东风转为东南风。图 15 为同一时刻陆基多普勒激光雷达观测数据图, 图 15(a) 为水平风速, 图 15(b) 为风向。受沿岸区域高空气溶胶浓度降低的影响,

陆基激光雷达高空探测能力相对较弱, 通过数据质量控制后只实现了海拔 100~1 000 m 范围内的风场探测, 图中同样可看到 400~1 000 m 高度内的高风速带, 其风速、风向的垂直结构及随时间的变化与机载激光雷达的观测结果是较为一致的。

图 16 显示了机载激光雷达走航观测与陆基激光雷达的 10 min 平均风廓线比对情况, 红线为陆基激光雷达观测数据, 黑线为机载激光雷达观测数据, 蓝色条带为机载激光雷达 10 min 内的标准偏差。由于机载激光雷达移动速度较快, 若选取直线飞行时的数据, 10 min 内观测区域偏差可达 10 km 以上, 比对数据的一致性会受到影响。为尽可能降低观测区域不一致引入的误差, 选取了 2016 年 12 月 18 日观测架次中 16:15~16:25 时段数据进行比对, 此时无人机在 S 点附近区域转向, 10 min 内机载激光雷达与陆基激光雷达的水平距离均小于 5 km。图 16(a)、(b) 为校正前的风速、风向廓线比对情况, 此时机载激光雷达观测到水平风速廓线与陆基观测数据平均偏差为 19.3 m/s, 与无人机飞行速度相近, 风向平均偏差为 97.32°, 受飞机转向影响, 风向廓线标准偏差较大。图 16(c)、(d) 为姿态、速度校正后反演的廓线比对情况, 水平风速及风向与陆基观测数据的比对结果均有显著提升, 水平风速平均偏差为 0.31 m/s, 风向平均偏差为 7.41°。

表5 机载激光雷达海上风场典型观测数据

Table 5 Typical offshore wind data observed by ACDL

时间	航线	飞行高度	最大风速	高风速带位置	观测到的典型现象
2016年11月20日	沿岸航线	1 200 m	9.8 m/s	海拔100~400 m	近海面区域高风速带
2016年12月17日	海岛航线	1 200 m	8.3 m/s	海拔700~1 100 m	海岛地形引起的高空风速变化
2016年12月18日	近海航线	1 200 m	9.9 m/s	海拔70~1 000 m	海上大气风场的水平稳定结构
2016年12月19日	近海航线	1 200 m	11.8 m/s	海拔400~1 100 m	海上大气风场的垂直稳定结构

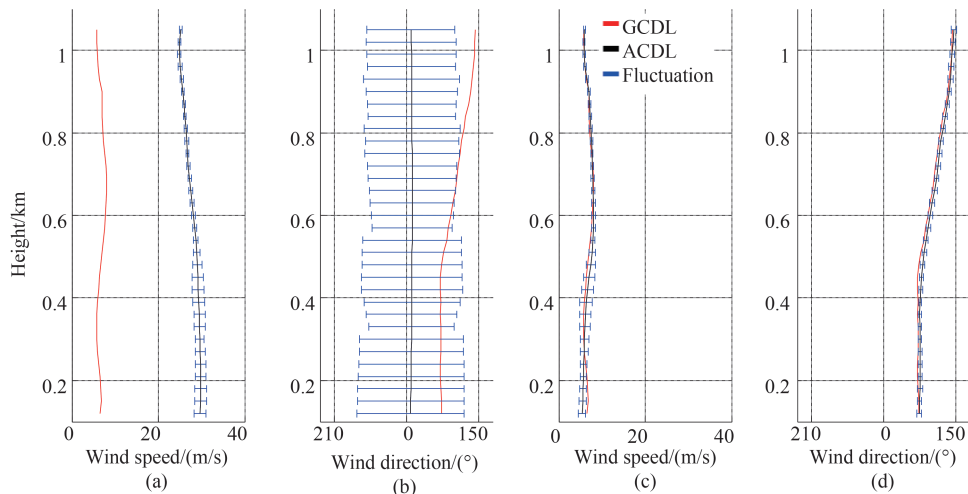


图16 GCDL及ACDL 10 min平均风廓线比对

Fig. 16 Comparison of 10-minutes average wind profile between GCDL and ACDL

为进一步统计试验期间机载激光雷达观测到的近岸风场数据,并分析机载激光雷达观测数据的精确度和有效性,选取无人机在陆基激光雷达附近3 km范围内飞行时两台雷达观测到的1 min水平风速及风向数据,按时间及观测高度进行匹配,并对机载激光雷达与陆基激光雷达观测到的风速、风向相关性进行了分析。图17(a)所示为水平风速信息,采样数 $N=877$ 组,决定系数 R^2 为0.97,标准偏差SD为0.49 m/s,偏离率Bias为0.15 m/s;图17(b)所示为风向信息,采样数 $N=877$ 组,决定系数 R^2 为0.99,标准偏差SD为10.98°,偏离率Bias为6.64°。数据统计显示,在观测试验过程中,近岸3 km区域内风速范围主要集中在4~11 m/s,风向范围主要集中在50°~140°,机载激光雷达与陆基激光雷达观测数据相关性较强,观测数据的标准偏差SD主要由1 min内机载激光雷达观测区域的变化引起,风向偏离率Bias则是由机载激光雷达安装时的角度偏离引起的。

利用机载多普勒激光雷达在不同距离库内获得的快速傅里叶变换FFT频谱信号的峰值可以计算激光雷达观测的信噪比数据,除反演海上大气风场数据之外,信噪比廓线上的变化情况可以直观的反

映大气气溶胶浓度的变化。自由大气中的气溶胶浓度通常小于对流层中的气溶胶浓度,随着高度的增加,激光雷达所观测到的信噪比数据会在边界层顶处快速减小^[36-37]。因此,通过对机载激光雷达信噪比数据的分析,可以实现对观测区域内海气边界层高度的观测及提取。图18所示为2016年12月19日早上的海气边界层观测数据,无人机沿航线3走航观测,在07:30-07:40期间曾短暂的爬升到1500 m高度处,实现了从上方对海气边界层的观测。通过采用标准偏差法对激光雷达采集到的信噪比数据进行计算,可以获得海气边界层的高度在1250 m左右。分析同一时间观测到的10 min平均风廓线,水平风速的大小及变化趋势在相应高度处也出现了较为明显的变化,如图18(b)所示。

4 总结

机载多普勒激光雷达系统基于脉冲相干多普勒激光雷达技术,具有高精度、高时空分辨率的特点。中国海洋大学激光雷达课题组研制的机载多普勒激光雷达采用了全光纤、模块化设计,具有体积小、低功耗、无微波电磁辐射等优点。机载激光雷达走航观测时,飞机平台引入的观测速度误差

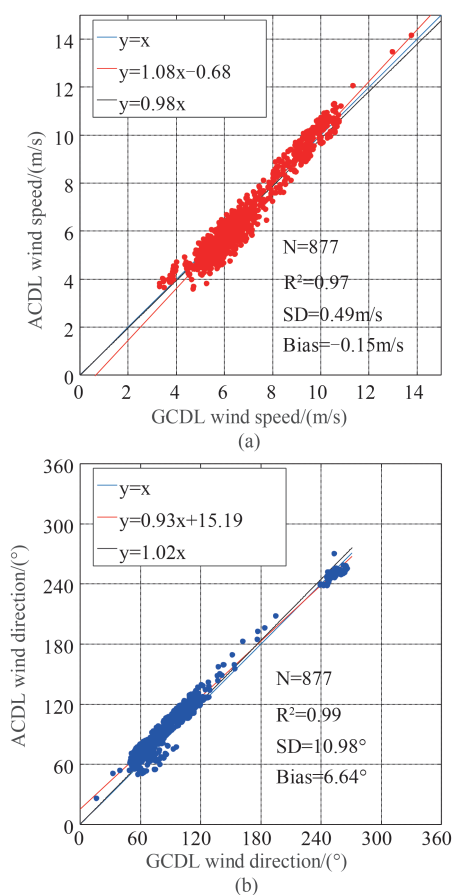


图 17 GCDL 及 ACDL 水平风速及风向观测结果比对
Fig. 17 Comparison of wind speed and wind direction between GCDL and ACDL

较大,在风场反演前必须予以校正。通过开发姿态及速度校正算法,能够实时校正激光雷达随飞机平台运动及姿态变化引入的误差,完成真实大气背景风场的快速精确反演。

在广东省海陵岛实现了国内首次无人直升机载激光雷达对海上风场的观测,激光雷达搭载在无人机平台上,实现了海面 30 m 以上区域的风场信息获取,并成功探测到了垂直高度上的风速分层、固定区域内的大气稳定结构等现象,基于激光雷达信噪比数据,反演了海气边界层的高度。相关风廓线观测结果与陆基相干多普勒激光雷达观测数据比对相关性较好,验证了系统的工作性能及校正反演算法的有效性。相较于目前广泛应用的陆基、船载激光雷达系统,机载激光雷达系统配合无人机等飞行平台快速、灵活移动的特点,具有更大范围、更灵活的区域风场观测能力,在低空区域,传统激光雷达受视角及近场回波信号饱和影响,存在观测盲区,机载激光雷达通过自上而下的观测方

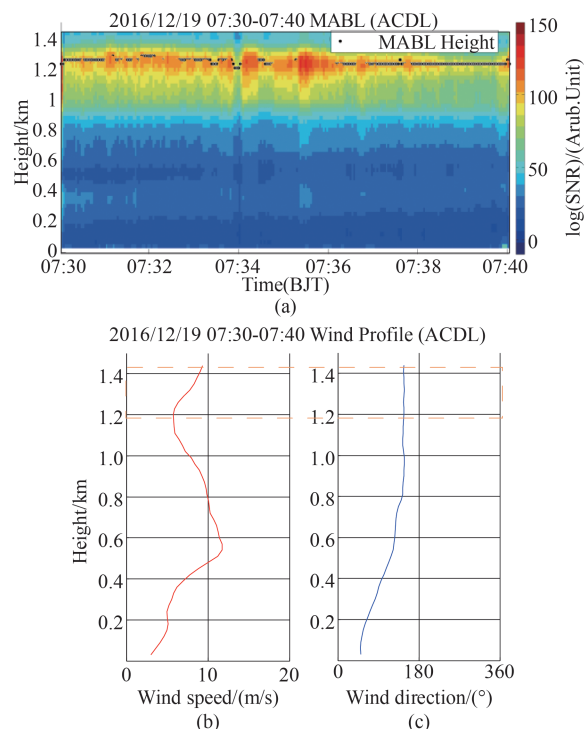


图 18 机载激光雷达海气边界层观测数据及风廓线
Fig. 18 Marine atmospheric boundary layer and wind profile obtained by ACDL

式,能够有效降低近地面/近海面区域的观测盲区;在高空区域,气溶胶浓度较低,传统激光雷达与观测目标距离较远,回波信号信噪比低,无法满足反演需求,机载激光雷达可通过调整飞行高度,对不同高度处的风场进行观测,在垂直方向上有效拓展了观测的范围,具有显著的优势。

机载激光雷达系统的应用能够填补现有固定气象站、浮标和探空气球等手段在海上风场观测领域的不足,为海气通量计算、海气相互作用研究等提供更精确的风场数据,推动海洋环境监测、海气边界层气象及动力学环境的研究,在海洋气象科研、海洋风能资源开发、海事活动保障等领域均具有广泛的应用前景。

致谢:本文的姿态校正及数据反演方法得到国家重点研发计划(2019YFC1408001, 2019YFC1408002)及国家自然科学基金(61975191)的支持。感谢戴光耀、尹彬、张芯瑜等在数据分析工作中的帮助以及刘磊在现场观测实验中的付出。感谢青岛镭测创芯科技有限公司王希涛、尹嘉萍、秦胜光的大力帮助。感谢中国海洋大学激光雷达课题组全体成员在本次实验中的支持和帮助。

References

- [1] Huffaker R M, Jelalian A V, Thompson J A L. Laser-Doppler system for detection trailing vortices of aircraft [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, **58**(3): 322-326.
- [2] Okoshi T, Kikuchi K. Frequency stabilization of semiconductor lasers for heterodyne-type optical communication systems [J]. *Electronics Letters*, 1980, **16**: 179-181.
- [3] Courtney M, Wagner R, Lindelöw P. Commercial lidar profilers for wind energy. A comparative guide [R]. Brussels: European wind energy conference, 2008.
- [4] LIU Yuan, LIU Ji-Qiao, CHEN Wei-Biao. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent doppler wind lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, (刘源, 刘继桥, 陈卫标. 人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器. *中国激光*) 2009, **36**(7): 1857-1860.
- [5] FENG Li-Tian, GUO Hong-Qi, CHEN Yong, *et al.* Experiment of all fiber Doppler lidar at 1.55 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (冯力天, 郭弘其, 陈涌, 等. 1.55 μm 全光纤多普勒测风雷达系统与试验. *红外与激光工程*) 2011, **40**(5): 844-847.
- [6] YIN Jia-Ping. Research and observation of turbine wake and wind field of MABL by coherent Doppler wind lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China, (尹嘉萍. 风机尾流场与海气边界层风场的多普勒激光雷达观测研究. 中国海洋大学) 2015.
- [7] ZHANG Hong-Wei, WU Song-Hua, YIN Jia-ping, *et al.* Airport low-level wind shear observation based on short-range CDL [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (张洪玮, 吴松华, 尹嘉萍, 等. 基于短距相干测风激光雷达的机场低空风切变观测. *红外与毫米波学报*) 2018, **37**(4): 468-476.
- [8] Wu S H, Zhai X C, Liu B Y. Aircraft wake vortex and turbulence measurement under near-ground effect using coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(2): 1142-1163.
- [9] Weitkamp C. *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere* [M]. Springer Science & Business, 2006: 102.
- [10] Bilbro 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.
- [11] McCaul E W, Bluestein H B, Doviak R J. Airborne Doppler lidar techniques for observing severe thunderstorms [J]. *Applied optics*, 1986, **25**(5): 698-708.
- [12] Bilbro J W, DiMarzio C, Fitzjarrald D, *et al.* Airborne Doppler lidar measurements [J]. *Applied optics*, 1986, **25**(21): 3952-3960.
- [13] Emmitt G D, O'Handley C, Wood S, *et al.* TODWL: An airborne Doppler wind lidar for atmospheric research, 2005 [C]. Annual American Meteorological Society Conf., 2nd Symp. Lidar Atmospheric Applications, 2005: P2.3.
- [14] Emmitt G D, Greco S, O'Handley C, *et al.* The multiple uses of the Navy's Twin Otter Doppler Wind Lidar (TODWL) for atmospheric research [R]. Boulder: 18th Coherent Laser Radar Conference, 2016.
- [15] Durand Y, Chinal E, Endemann M, *et al.* ALADIN airborne demonstrator: a Doppler wind lidar to prepare ESA's ADM-Aeolus Explorer mission [J]. *Proc. SPIE Optics and Photonics*, 2006, **6296**: 6291-1D.
- [16] Reitebuch O, Lemmerz C, Marksteiner U, *et al.* Airborne lidar observations supporting the ADM-Aeolus mission for global wind profiling, 2012 [C]. 26th International Laser Radar Conference, 2012: 759-762.
- [17] Li Z, Lemmerz C, Paffrath U, *et al.* Airborne Doppler lidar investigation of sea surface reflectance at a 355-nm ultraviolet wavelength [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, **27**(4): 693-704.
- [18] Marksteiner U, Lemmerz C, Lux O, *et al.* Calibrations and wind observations of an airborne direct-detection wind LiDAR supporting ESA's Aeolus mission [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(12): 2056.
- [19] Inokuchi H, Tanaka H, Ando T. Development of a long range airborne Doppler Lidar, 2010 [C]. 27th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, 2010, **10**(3).
- [20] Inokuchi H, Furuta M, Inagaki T. High altitude turbulence detection using an airborne Doppler lidar, 2014 [C]. 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. 2014.
- [21] Gentry B, Chen H, Cervantes J, *et al.* Airborne testing of the TWiLiTE direct detection Doppler lidar [C]. 16th Coherent Laser Radar Conference, 2011: 20-24.
- [22] Marksteiner U, Reitebuch O, Lemmerz C, *et al.* Airborne direct-detection and coherent wind lidar measurements over the North Atlantic in 2015 supporting ESA's aeolus mission, 2018 [C]. EPJ Web of Conferences, 2018, **176**: 02011.
- [23] Yorks J E, McGill M J, Scott V S, *et al.* The airborne cloud - aerosol transport system: Overview and description of the instrument and retrieval algorithms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, **31**(11): 2482-2497.
- [24] Yorks J E, McGill M J, Hlavka D L. A new high spectral resolution lidar technique for direct retrievals of cloud and aerosol extinction, 2014 [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2014: A13N-01.
- [25] Grund C J, Tucker S C. Optical autocovariance wind lidar (OAWL): A new approach to direct-detection Doppler wind profiling, 2011 [C]. 5th Symposium on Lidar Atmospheric Applications, 2011.
- [26] Hardesty M, Tucker S, Baidar S, *et al.* Airborne tests of an OAWL Doppler lidar: Results and potential for space deployment, 2018 [C]. EPJ Web of Conferences, 2018, **176**: 02004.
- [27] CHEN Yong, ZHOU Bing-Zhi, TAN Jin, *et al.* Research and application of airborne laser Doppler wind lidars [J]. *Laser Technology*, (陈涌, 周秉直, 谭锦, 等. 机载激光多普勒测风雷达技术及其应用. *激光技术*) 2011, **35**(6): 795-799.
- [28] LI Zhi-Gang, SUN Ze-Zhong, ZHAO Zeng-Liang, *et al.* Wind retrieval of all fiber Doppler wind lidar and experimental verification [J]. *Journal of Applied Optics*, (李志刚, 孙泽中, 赵增亮, 等. 机载光纤多普勒测风激光雷达风场反演及实验验证. *应用光学*) 2016, **37**(5): 765-771.
- [29] HU Shen-Sen, LIU Ji-Qiao, DIAO Wei-Feng, *et al.*

- Wind profile inversion based on airborne Doppler wind lidar [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, (胡申森, 刘继桥, 刁伟峰, 等。机载多普勒激光测风雷达风场反演研究。气象科学) 2016, **36**(1): 96-101.
- [30] ZHU Xiao-Peng, LIU Ji-Qiao, ZHANG Xin, *et al.* An Airborne all Fiber Coherent Doppler Lidar for Wind Sensing, 2017 [C]. Proceedings of the 4th Annual Conference on High Resolution Earth Observation (竹孝鹏, 刘继桥, 张鑫, 等。机载全光纤相干激光测风雷达研究。第四届高分辨率对地观测学术年会论文集) 2017, 461-468.
- [31] Wu S, Wang Q, Liu B, *et al.* UAV-borne coherent doppler lidar for marine atmospheric boundary layer observations, 2018 [C]. EDP Sciences. 2018, **176**:02012.
- [32] Wu S, Wang Q, Liu J, *et al.* A UAV-borne Compact Coherent Doppler Lidar for Marine Boundary Layer Wind Remote Sensing, 2018 [C]. Optics and Photonics for Energy and the Environment. Optical Society of America, 2018: ET3A. 7.
- [33] Marksteiner U. Airborne wind lidar observations for the validation of the ADM-Aeolus instrument [D]. Munich: Technische Universität München, 2013.
- [34] LI Zhi-Gang, SUN Ze-Zhong, ZHAO Zeng-Liang, *et al.* Influence analysis and calibration of laser pointing for airborne Doppler lidar [J]. *LASER & INFRARED*, (李志刚, 孙泽中, 赵增亮, 等。激光与红外) 2016, **46**(12): 1467-1472.
- [35] Li Zhi-Gang, Liu Zhi-Shen, Zhu Jin-Shan, *et al.* Wind Retrieval Algorithms For The Wind Products Of The Airborne Coherent Doppler Lidar, 2013 [C]. Proceeding Dragon 3, 2013.
- [36] Tao Zong-Ming, Wu De-Cheng, Liu Dong, *et al.* Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, (陶宗明, 吴德成, 刘东, 等。中国激光) 2011, **38**(12): 1214001.
- [37] WANG Dong-Xiang, SONG Xiao-Quan, FENG Chang-Zhong, *et al.* Coherent Doppler lidar observation of marine atmospheric boundary layer height in the Bohai and Yellow sea [J]. *Acta Optica Sinica*, (王东祥, 宋小全, 冯长中, 等。光学学报) 2015, **35**: s101001.