

多普勒激光雷达多波束测风精度及获取率分析

宋小全^{1,2*}, 龙文睿¹, 云龙³, 卢超⁴, 尹嘉萍⁵¹中国海洋大学信息科学与工程学院海洋技术系, 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深圳市环境监测中心站, 广东 深圳 518049;⁴深圳市国家气候观象台, 广东 深圳 518040;⁵青岛镭测创芯科技有限公司, 山东 青岛 266101

摘要 相干多普勒激光雷达作为观测风场信息的有效探测工具, 广泛应用于不同场景的风场以及大气观测。2019 年 8 月, 研究人员利用相干多普勒激光雷达在深圳市石岩综合气象观测基地连续开展了 13 d 的风廓线观测实验。分析了多普勒波束扫描模式下五波束法、三波束法和二波束法反演结果的异同及这些方法对测风精度和数据获取率的影响。数据比对结果表明, 三波束法和二波束法的反演结果与五波束法所得结果有较好的一致性。针对激光雷达实际观测中系统或大气状态如云雾、降水等导致个别波束信噪比较低的问题, 需灵活选取波束以反演风场、增加数据获取率, 得到的探测高度平均提高量为 100~400 m。

关键词 大气光学; 激光雷达; 多普勒波束扫描模式; 精度; 获取率

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1001001

Analysis of Accuracy and Acquisition Rate of Doppler Lidar
Multi-Beam Wind MeasurementSong Xiaoquan^{1,2*}, Long Wenrui¹, Yun Long³, Lu Chao⁴, Yin Jiaping⁵¹College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;²Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology Qingdao, Qingdao, Shandong 266237, China;³Shenzhen Environmental Monitoring Center Station, Shenzhen, Guangdong 518049, China;⁴Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen, Guangdong 518040, China;⁵Qingdao Leice Transient Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266101, China

Abstract As an effective detection tool for observing wind field information, a coherent Doppler lidar is widely used in wind field and atmospheric observations in different scenarios. In August 2019, researchers used the coherent Doppler lidar to continuously carry out a wind profile observation experiment for 13 d at the Shenzhen Shiyan Comprehensive Meteorological Observation Base. The similarity and difference of inversion results of the five-beam, three-beam, and two-beam methods in the Doppler beam scanning mode and the influences of these methods on wind measurement accuracy and data acquisition rate are analyzed. The data comparison results show that the inversion results of the three-beam method and the two-beam method are in good agreement with the results obtained by the five-beam method. In view of the low signal-to-noise ratio of individual beams caused by the system or atmospheric conditions, such as clouds, fog, and precipitation, in actual observation of the lidar, it is necessary to flexibly select the beams to invert the wind field and increase the data acquisition rate. The average increase in detection height obtained is 100–400 m.

收稿日期: 2020-10-21; 修回日期: 2020-11-26; 录用日期: 2020-12-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0213101, 2016YFC1400905)、国家自然科学基金(61775200)

* E-mail: songxq@ouc.edu.cn

Key words atmospheric optics; lidar; Doppler beam scanning mode; accuracy; acquisition rate

OCIS codes 010.1290; 280.3640; 280.7250; 010.3640

1 引言

精确测量大气风场分布在保障航空航天安全、提高天气预报准确率、提高风电行业的发电效率、优化飞机起降密度等方面具有重要应用,提高风场测量的时空分辨率以及精度一直是重要研究课题^[1-3]。监测风场信息的探测手段主要有气象自动站的机械风速计和超声风速计、微波雷达^[4]、风廓线雷达和激光雷达^[5]。相干多普勒激光雷达是近年来发展快速的光波主动式遥感技术,其具有分辨率高、非接触测量等一系列优点,并满足机载、星载对于质量轻、体积小探测要求,已经在大气风场探测领域得到了广泛的应用^[6-8]。

相干多普勒激光雷达观测风场信息时,其测量模式通常有速度方位显示(VAD)^[9]、距离高度显示^[10]和多普勒波束扫描(DBS)^[11]等。其中 DBS 模式涉及扫描波束更少,可以得到更高时间刷新率的测量数据^[12]。Pearson 等^[11]分析了在一次多波束的 VAD 测量周期内,实际等同于完成了多次 DBS 测量,因而可以更完整地捕获不稳定的气流。根据测量和反演时所采用的不同径向风速个数, DBS 法通常分为五波束法(DBS_5)、三波束法(DBS_3)或其他 N 波束方法(DBS_N)。Lane 等^[13]利用三波束的多普勒波束扫描模式观测城市下垫面的风场信息。在城市环境中,大气气流在时间和空间上变化更快,通过减少扫描波束可以让多普勒波束扫描模式的扫描

周期更短。通过对比多普勒波束扫描模式中的三波束法和五波束法,可以发现两种反演方法在不同高度上均表现出较好的一致性^[14]。

相干多普勒激光雷达通过发射激光光束测量大气中气溶胶粒子的运动速度,从而通过反演得到风场信息^[15-17]。根据激光雷达的光束在大气中的传播特性,复杂天气情况会影响相干多普勒激光雷达所能达到的有效探测高度^[18]。在低空云层较多、持续性降水、大气湿度较高等天气条件下,常会出现回波信号信噪比(R)较低的情况^[19-21],这导致反演出的三维风场数据获取率较低,有效探测高度无法达到目标值^[7, 22-23]。本文分析了激光雷达在多普勒波束扫描模式下选用不同波束测量风场信息的准确性,并利用多波束反演水平风速风向的算法提高数据获取率,从而提高其在复杂天气情况下的有效探测高度。

2 实验概况和数据获取

观测实验仪器为中国海洋大学和青岛镭测创芯科技有限公司联合研发的 Wind3D 6000 型相干多普勒测风激光雷达,其技术指标如表 1 所示。该系统的距离分辨率为 15 m,理想状态的探测距离为 6000 m,风廓线测量选用多普勒波束扫描(DBS)测量模式中的五波束法。实验地点选在深圳市石岩综合气象观测基地(113.9°E, 22.7°N),该地有 356 m 高的气象梯度塔。基地位于深圳市西北方向,距离最近的海岸线 10 km 左右,地势较高,远离闹市区。

表 1 相干多普勒激光雷达技术指标

Table 1 Specifications of coherent Doppler wind lidar

Parameter	Value	Parameter	Value
Wavelength / μm	1.5 (eye-safe)	Radial wind speed range / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-37.5-37.5
Data updating rate / Hz	1-10	Wind speed accuracy / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	± 0.1
Detection range / m	45-6000	Range resolution / m	15-30

实验时间为 2019 年 8 月至 10 月,本文选取 2019 年 8 月 3 日至 8 月 15 日受到低云等影响最明显的连续观测资料作为研究数据。因夏季多雨且毗邻海岸,实验期间出现低云、降水、雾霾等天气状况,影响激光的大气传输。13 d 连续观测期间天气状况复杂,晴空

天气占比较低,低云、降水、相对湿度大于 80% 和空气质量情况的占比统计如表 2 所示,其中 A_{QI} 为空气质量指数。在激光雷达观测大气风场信息时,这些天气状况使得激光雷达的探测距离和数据获取率均因受到影响而较低。图 1 为多普勒激光雷达测量现场。

表 2 复杂天气状况占比

Table 2 Ratio of complex weather conditions

Weather condition	Low clouds	Precipitation	Relative humidity $\geq 80\%$	Air quality $50 < A_{\text{QI}} \leq 100$	Air quality $A_{\text{QI}} > 100$
Proportion / %	47	12	58	7	4

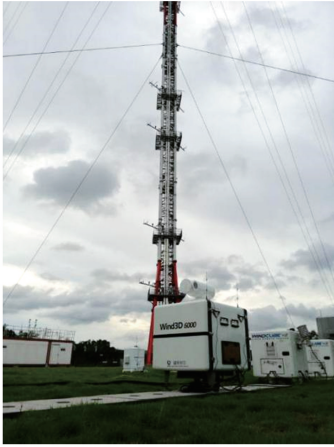


图 1 多普勒激光雷达测量现场
Fig. 1 Doppler lidar measurement site

3 多普勒波束扫描反演水平风速风向廓线

3.1 算法原理

根据多普勒激光雷达原理,激光光束遇到大气中气溶胶等粒子会发生散射。气溶胶等粒子随大气运动形成相对激光光束的运动,其后向散射信号被激光雷达系统接收,与出射光原始光束即本振光进行拍频以检测出多普勒频移^[24]。多普勒频移 f_D 与激光光束出射方向的径向风速分量 V_{los} 之间的关系可表示为

$$f_D = \frac{2V_{los}}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: λ 表示发射激光波长。

在反演风矢量的三维风场时,激光以 DBS 方式(即相同仰角 θ 、不同方位角)进行扫描测量,获得多个径向风速分量。假设激光光束所观测区域不同高度处的大气风场水平均匀,通过反演出不同高度风速的南北向、西东向和垂直向分量,得到大气水平风速风向廓线信息。

相干多普勒激光雷达利用沿波束方向的原始径向速度反演风场信息时,表征实际回波信号强度的信噪比(SNR)是一个非常重要的指标参数。处理数据时,通常需要合理设置信噪比门限阈值(T_{SNR}),以对原始数据进行质量控制。当回波数据的信噪比高于门限阈值时,将回波数据设为有效数据,否则设为无效数据,回波数据不参与风速风向反演。五波束法 DBS_5 使用东、南、西、北以及垂直 5 个方向上的波束,其测量扫描模式如图 2 所示。图中右下角小图及图中箭头为本系统实际观测时激光光束的实际扫描顺序,按照北(N)、垂直(Z)、南(S)、西(W)、东

(E)、北(N)的扫描顺序循环进行观测,针对每个指向数据进行测量的累积时间一般设为 1 s。DBS_5 法反演三维风场时需要保证 5 个指向波束的信噪比均满足门限阈值,这导致风速风向的反演由 5 个波束中有效数据获取高度最低的波束决定。

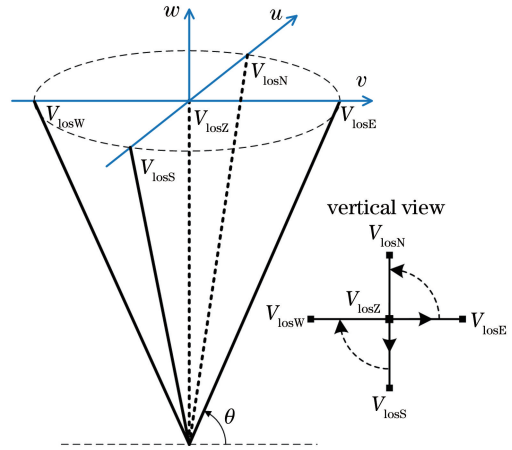


图 2 DBS 扫描模式示意图
Fig. 2 Diagram of DBS scanning mode

DBS_5 方法可利用径向风速反演南北向风速分量 u 和西东向风速分量 v ,进而合成水平风速 V_h 。垂直方向的风速 w 由垂直方向波束的径向风速 V_{losZ} 直接得出, V_{losN} 、 V_{losS} 、 V_{losE} 、 V_{losW} 分别表示北、南、东、西方向的径向风速。该方法为 DBS 反演风矢量的主流方法,需要各个波束均满足信噪比阈值要求,因此对大气水平均匀假设的依赖度稍高。

DBS_3 方法利用相互正交的两个方向加垂直方向共三个波束的径向风速数据进行反演,以北向波束和东向波束这组正交方向为例。该方式仅需要三个波束满足信噪比门限阈值要求,测量方向较少,因此在相同时长的观测周期内,观测循环次数增加了,数据刷新率提高了,但其受方位角的角度误差影响较大。DBS_5 方法和 DBS_3 方法分别满足

$$\begin{cases} u = \frac{V_{losN} - V_{losS}}{2\cos\theta} \\ v = \frac{V_{losE} - V_{losW}}{2\cos\theta} \\ V_h = \sqrt{u^2 + v^2} \\ w = V_{losZ} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} u = \frac{V_{losN} - V_{losZ}\sin\theta}{\cos\theta} \\ v = \frac{V_{losE} - V_{losZ}\sin\theta}{\cos\theta} \\ V_h = \sqrt{u^2 + v^2} \\ w = V_{losZ} \end{cases}. \quad (3)$$

与水平方向的风速相比,大多天气条件下垂直气流即垂直方向上的风速 $V_{\text{los}z}$ 较小 ($<1 \text{ m/s}$)。在利用 DBS_3 法和 (3) 式进行测量和反演时,可忽略 $V_{\text{los}z}$ 或认为其等于 0, 测量模式进而变为二波束法 DBS_2。图 3 中统计显示了 2019 年 8 月 3 日至 8 月 15 日利用垂直方向波束测得的 10 min 平均径向风速, 其中正值为垂直向上, 负值为垂直向下。可以看出, 各个高度和测量周期内绝大部分的垂直风速介于 -0.5 m/s 和 0.5 m/s 之间。图

4 给出了垂直方向径向风速的频率分布直方图, 图中 n_z 为参与计算的所有高度处垂直方向风速数据总量。经拟合, 垂直方向风速的频率分布基本符合正态分布, 所有观测数据中垂直风速标量值小于 1 m/s 的占 96.4%。因此, 与水平风速相比, 在计算 u 、 v 速度分量时, $V_{\text{los}z} \sin \theta$ 的贡献较小。在可以接受一定误差的前提下, 可忽略垂直方向风速的影响, 仅用相互正交的两个波束计算合成水平风速。

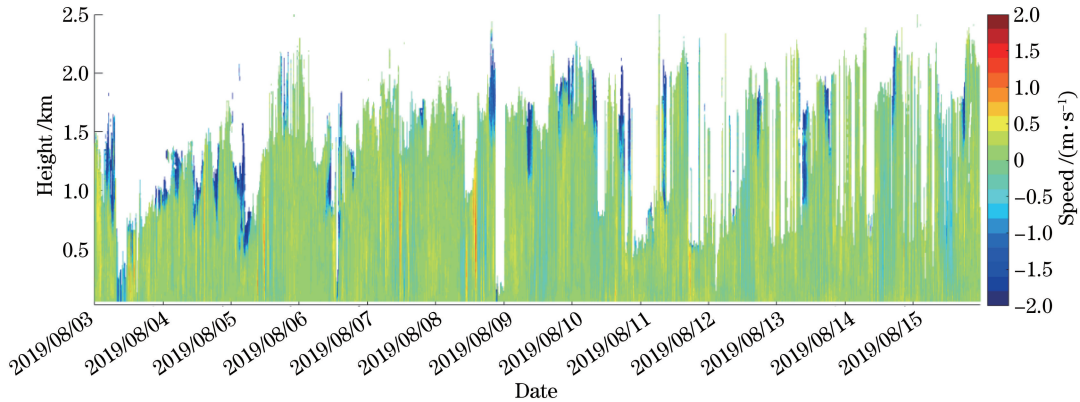


图 3 垂直方向风速时序观测

Fig. 3 Time series observation of vertical wind speed

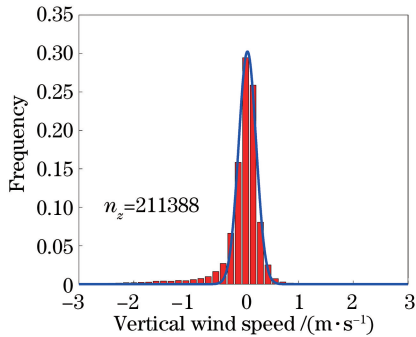


图 4 垂直方向风速频率分布图

Fig. 4 Histogram of vertical wind speed frequency distribution

以北向和东向两个正交指向波束观测为例, 用 DBS_2 合成水平风速的计算方法为

$$\begin{cases} u = \frac{V_{\text{losN}}}{\cos \theta} \\ v = \frac{V_{\text{losE}}}{\cos \theta} \\ V_h = \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases} \quad (4)$$

对于上述三种 DBS 反演方法, 反演得到的风矢量的风向为

$$\alpha = \left| \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \right| \quad (5)$$

由于风向是在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化, 因此最终需要判断风矢量具体在哪个象限。象限划分为

$$\begin{cases} \alpha = \alpha & u \geq 0, v \geq 0 \\ \alpha = 180^\circ - \alpha & u < 0, v \geq 0 \\ \alpha = 180^\circ + \alpha & u < 0, v < 0 \\ \alpha = 360^\circ - \alpha & u \geq 0, v < 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 测风准确性分析

为验证 DBS_3 法和 DBS_2 法反演风速风向的准确性, 选取 180 m 高度将两种方法的反演结果与常用的 DBS_5 法的反演结果进行比对, 如图 5 所示。可以看出, 实验期间该高度处风速为 $2 \sim 8 \text{ m/s}$, 三种方法的反演结果的变化趋势基本保持一致。如图 6 所示, 图 6(a)、(b) 分别是 DBS_3 法与 DBS_5 法的风速和风向数据比对结果散点图, 决定系数分别为 0.93 和 0.98; 图 6(c)、(d) 分别为 DBS_2 法与 DBS_5 法的风速风向比对结果散点图, 相较于 DBS_2 法, DBS_5 法的决定系数略低, 但也在 0.9 以上。图 6 中, r^2 为决定系数, S_D 为均方根误差, B_1 为平均绝对偏差, n 为参与比对数据组的数目。

三波束法反演时仅需要假设同一高度处五波束法扫描覆盖面积的 $1/4$ 区域的大气风场均匀, 在湍流强度更大、大气均匀性更差时会因扫描覆盖的面

积更小、大气均匀性更容易满足条件而获得更准确的反演结果。Lane 等^[13]的研究也表明三波束法更适用于湍流强度较大的城市地区。而二波束法虽然

忽略了垂直方向风速的影响,带来部分误差,但因垂直风速与水平风速相比总体较小,垂直风速对结果的影响较小。

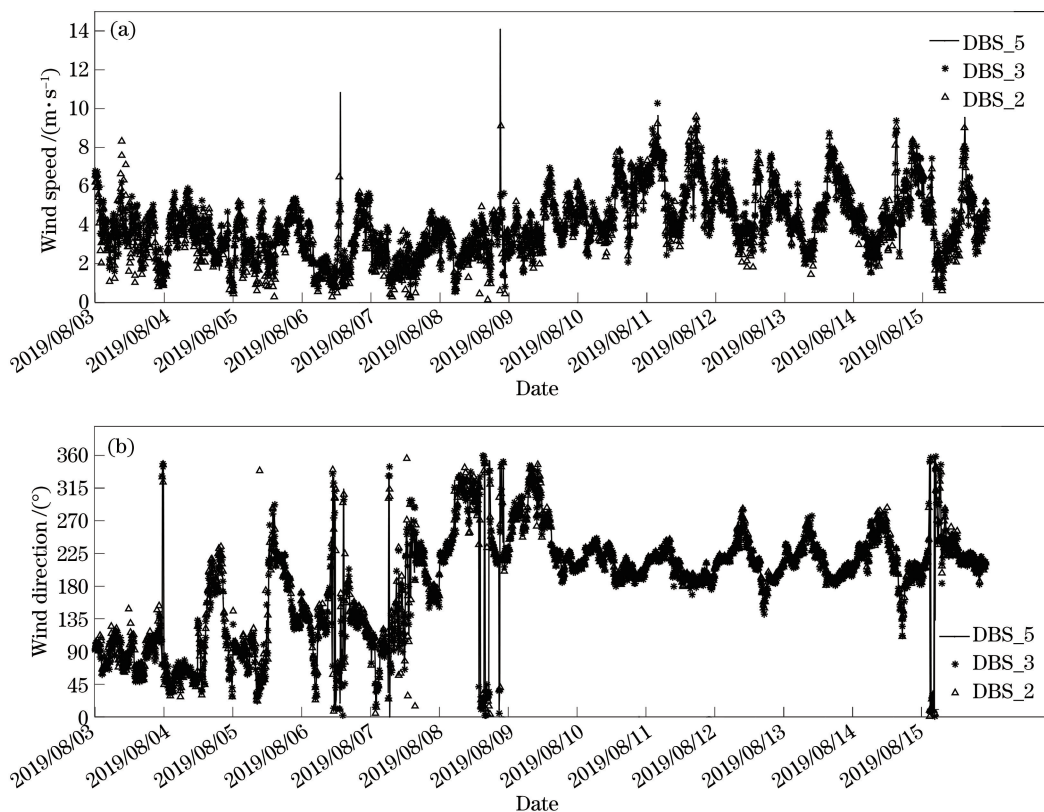


图 5 10 min 平均风速风向折线图。(a) 风速;(b) 风向

Fig. 5 Line charts of 10 min average values of wind speed and wind direction. (a) Wind speed; (b) wind direction

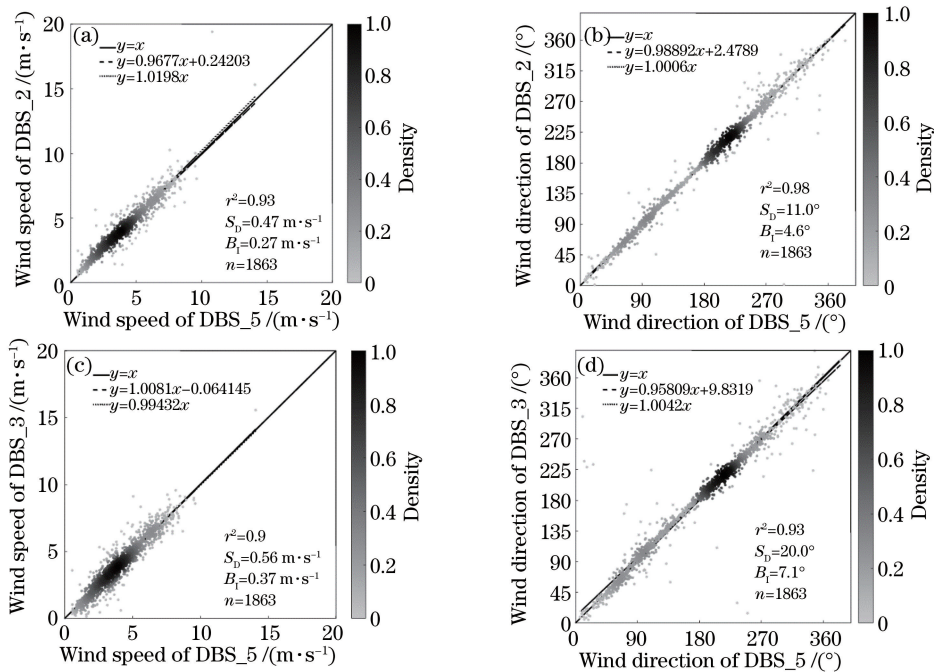


图 6 风速风向散点对比图。(a)(b) DBS_2 和 DBS_5;(c)(d) DBS_3 和 DBS_5

Fig. 6 Scatter plots of wind speed and wind direction. (a)(b) DBS_2 and DBS_5; (c)(d) DBS_3 and DBS_5

4 风廓线测量结果的数据获取率与测量高度提升

4.1 算法原理

采用五波束法反演三维风场时,需保证 5 个波束在同一高度的信噪比同时满足信噪比的门限阈值。五波束法的风速风向数据的最终反演和获取高度由有效数据最少或探测高度最低的波束决定,数据获取率或测量高度会偏低。为提高多普勒激光雷达有效数据获取率,在五波束法结果基础上,针对个别波束信噪比低的情况选用三波束法或二波束法反演风速风向。

算法流程如图 7 所示,图中 R 为信噪比,下标 N,E,V,S,W 代表不同的方向。当 5 个波束的信噪比都大于门限阈值时,使用五波束法反演风速风向;若信噪比小于门限阈值,则采用三波束法;如果垂直

方向的波束信噪比达不到阈值标准,则选用二波束法合成风矢量。对于三波束法和二波束法中相互正交方向的波束选取,可参考图 2 中扫描波束的俯视图和扫描顺序。激光波束从东向扫描到北向或从南向扫描到西向,扫描指向顺序相邻,总用时为 1 个扫描间隔时间和 2 个指向波束测量时间之和,约为 3 s。而对于北向-西向、东向-南向这两组正交方向的波束,按照激光波束的扫描顺序模式,总用时为 3 个扫描间隔时间和 4 个指向波束测量时间之和,约为 5~6 s。不同指向上的波束测量间隔时间越长,大气均匀的假定条件被破坏的可能性越大。为减小激光波束时间间隔所形成的误差,在采用三波束法和二波束法补充处理数据时,优先选用东向-北向和南向-西向这两组波束;若这两组波束的信噪比不满足阈值要求,再选用北向-西向和东向-南向波束进行反演和数据补足。

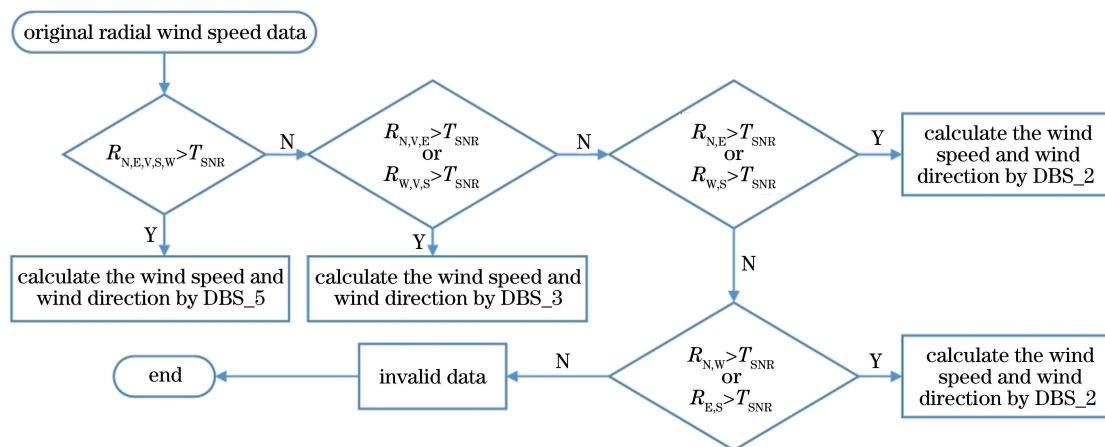


图 7 数据获取率增强算法流程图

Fig. 7 Flow chart of data acquisition rate enhancement algorithm

4.2 实验结果

选用 2019 年 8 月 3 日至 8 月 15 日共 13 d 的完整观测资料,分别使用五波束法 DBS_5、五波束结合三波束反演算法 DBS_5+3、五波束结合三波束和二波束反演算法 DBS_5+3+2、五波束结合三波束和二波束并同时考虑 NW(北向西向)和 ES(东向南向)波束组合的反演算法 DBS_5+3+2+s 共 4 种方式,反演水平风速风向等风廓线信息。图 8 为实验观测周期内的平均数据获取率折线图,可以看出,增加三波束法补充数据后,相对于原始数据而言,数据获取率在各高度的增加明显。由此可见,在实际观测过程中,普遍存在由 1 或 2 个波束信噪比较低而导致的数据缺失。而 DBS_5+3+2 反演算法和 DBS_5+3+2+s 反演算法可以在 500~2000 m 的观测高度上,使数据获取率有较为明显的

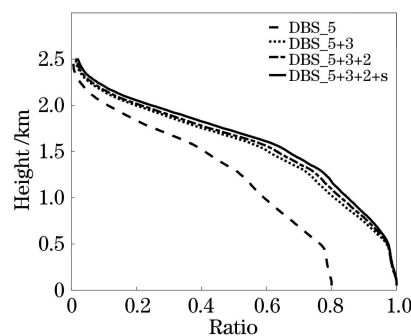


图 8 平均数据获取率

Fig. 8 Average data acquisition rate

提升。

在约 500 m 以下的高度处,三种数据获取率增强算法体现出很好的一致性。在该高度范围,云层等干扰激光雷达信号的状况少,5 个波束中仅有个别方向

的波束信噪比低于阈值,影响 DBS_5 的数据获取率。在这种情况下, DBS_5+3、DBS_5+3+2 和 DBS_5+3+2+s 都可以同等程度地提高数据质量。500 m 以上的高度处出现了较多垂直方向波束信噪比不满足门限阈值的情况,这制约了这些高度上的数据获取。加入二波束法的 DBS_5+3+2、DBS_5+3+2+s,可

以在垂直波束信噪比不满足门限阈值时进行反演,得到风场信息,这在图 8 中表现为 500 m 以上这两种方法与 DBS_5+3 差异增大。如图 9 所示,在共计 13 d 的实验观测中, DBS_5+3+2 反演算法对有效探测高度的平均提高量为 100~400 m,这主要受到不同时段数据量和数据特点的影响。

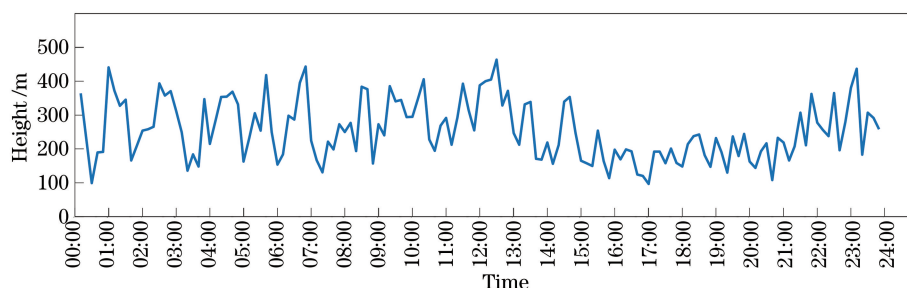


图 9 探测高度平均提高量时序图

Fig. 9 Timing diagram of average increasing of detection height

5 结 论

基于在深圳市石岩综合气象观测基地的实验,针对多普勒激光雷达在 2019 年 8 月 3 日至 8 月 15 日连续 13 d 的观测结果,探讨分析了多普勒波束扫描模式下选用更少的波束反演风速风向的方法并对准确率进行了对比。统计分析表明,观测实验过程中垂直方向风速主要集中在 $-0.5 \sim 0.5$ m/s。在可以接受一定误差的条件下,提出可忽略垂直方向波束测量,使用二波束法进行反演。将三波束法和二波束法反演得到的风速风向与常用的五波束法得到的结果进行比对,发现三波束法和五波束法的相关性最好;二波束法中垂直波束测量不参与反演和计算,忽略了垂直方向风速的影响,使得其相比于五波束法的相关性稍差,二者回归分析的决定系数均在 0.9 以上,这验证了三波束法和二波束法反演风速风向的可行性。针对实验过程中出现低云、降水、空气污染等复杂天气影响数据获取率以及探测高度的情况,提出了增加相干激光雷达探测高度的多波束反演方法和数据处理流程,探测高度平均提高量为 100~400 m。多波束结合反演风速风向的方法,可以为对激光雷达在复杂天气状况下的观测数据的处理提供参考手段。

参 考 文 献

- [1] Garnier A, Chanin M L. Description of a Doppler rayleigh LIDAR for measuring winds in the middle atmosphere[J]. Applied Physics B, 1992, 55(1): 35-40.
- [2] Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, et al. Application and development direction of lidar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-22.
赵一鸣, 李艳华, 商雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.
- [3] Ma X M, Tao Z M, Shan H H, et al. Statistical distribution of extinction coefficients of tropospheric aerosols detected by lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1101003.
麻晓敏, 陶宗明, 单会会, 等. 激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101003.
- [4] Sadovsky I N, Kuzmin A V, Pospelov M N, et al. Dynamics of short sea wave spectrum estimated from microwave radiometric measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(9): 3051-3056.
- [5] Eilts M D, Doviak R J, Rajan A S, et al. Comparison of winds, waves, and turbulence as observed by airborne lidar, ground-based radars, and instrumented tower[J]. Radio Science, 1984, 19(6): 1511-1522.
- [6] Gao P, Hu Y H, Zhao N X, et al. Accuracy analysis of all-fiber differential absorption lidar for atmospheric component [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301003.
高坡, 胡以华, 赵楠翔, 等. 全光纤差分吸收激光雷达大气成分探测精度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301003.
- [7] Zhang Z Y, Cai Y, Yu D S, et al. Two-dimensional wind field measurement based on lidar signal correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6):

0601003.
张战盈, 蔡熠, 余东升, 等. 基于相关计算的激光雷达二维风场探测[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0601003.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Davies F, Collier C G, Bozier K E, et al. On the accuracy of retrieved wind information from Doppler lidar observations[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2003, 129(587): 321-334.
- [11] Pearson G, Davies F, Collier C, et al. An analysis of the performance of the UFAM pulsed Doppler lidar for observing the boundary layer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(2): 240-250.
- [12] Yin J P. Research and observation of turbine wake and wind field of MABL by coherent Doppler wind lidar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
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[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [13] Lane S E, Barlow J F, Wood C R, et al. An assessment of a three-beam Doppler lidar wind profiling method for use in urban areas[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 119: 53-59.
- [14] 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.
- [15] Wu S H, Liu B Y, Liu J T, et al. Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar[J]. Optics Express, 2016, 24(10): A762-A780.
- [16] Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 21-27.
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 21-27.
- [17] Liu J T, Chen W B, Song X Q, et al. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1548-1553.
刘金涛, 陈卫标, 宋小全, 等. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1548-1553.
- [18] Pauscher L, Vasiljevic N, Callies D, et al. An inter-comparison study of multi- and DBS lidar measurements in complex terrain[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 667.
- [19] Dong X, Hu Y H, Xu S L, et al. Echoing characteristics of coherent lidar in different aerosol environments[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0101001.
董骁, 胡以华, 徐世龙, 等. 不同气溶胶环境中相干激光雷达回波特性[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0101001.
- [20] Zhao M, Guo P, Rui X B, et al. Wind-field vector retrieval method at low signal-to-noise ratio for coherent Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1110005.
赵萌, 郭磐, 芮训豹, 等. 低信噪比下相干多普勒激光雷达风场矢量反演算法[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1110005.
- [21] Wang G C, Sun D S, Duan L F, et al. Analysis of factors affecting the data accuracy of Doppler wind lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0901003.
王国成, 孙东松, 段连飞, 等. 多普勒测风激光雷达风场数据影响因素分析[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0901003.
- [22] Garnier A, Chanin M L. Description of a Doppler rayleigh LIDAR for measuring winds in the middle atmosphere[J]. Applied Physics B, 1992, 55(1): 35-40.
- [23] Zhou A R, Han Y L, Sun D S, et al. Analyzing and testing of performances of high optical efficiency CDL in wind sensing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 76-82.
周安然, 韩於利, 孙东松, 等. 高光学效率相干多普勒激光雷达的测风性能分析与测试[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 76-82.
- [24] Ma F M, Chen Y, Yang Z H, et al. Latest development of laser Doppler wind measurement technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180003.
马福民, 陈涌, 杨泽后, 等. 激光多普勒测风技术最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180003.