

相干测风激光雷达 VAD 风场反演的数据质量控制方法

王贵宁¹, 刘秉义^{1*}, 冯长中¹, 吴松华¹, 刘金涛¹, 王希涛², 李荣忠²

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

2. 青岛航天海鹰环境科技有限责任公司, 山东 青岛 266100)

摘要: 相干测风激光雷达扫描测量模式下使用速度方位显示(VAD)方法反演水平风场时, 若不进行质量控制, 会使拟合数据精度大幅降低。基于最小二乘 VAD 拟合算法, 通过分析相干测风激光雷达扫描测量模式中的多种误差源, 设置了信噪比、数据残差、扫描区间有效数据、数据有效率四个判据对参与拟合的数据质量进行控制, 进而提出了基于以上判据的 VAD 逐级拟合质量控制方案, 设计了数据质量控制流程, 并对该方法进行了实验验证。通过对 2 955 组 10 min 平均激光雷达测风数据与高精度风杯数据进行对比分析, 结果表明: 经 VAD 逐级拟合质量控制流程后, 风速均方根偏差从 0.97 m/s 降低到 0.54 m/s, 比对偏差降低约 44%, 风向均方根偏差从 7.47° 降低到 5.55°, 比对偏差降低约 26%。

关键词: VAD 反演算法; 相干测风激光雷达; 数据质量控制

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0230002

Data quality control method for VAD wind field retrieval based on coherent wind lidar

Wang Guining¹, Liu Bingyi^{1*}, Feng Changzhong¹, Wu Songhua¹, Liu Jintao¹, Wang Xitao², Li Rongzhong²

(1. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Seaglet Environment Technology Inc, Qingdao 266100, China)

Abstract: The precision of wind field retrieved from coherent wind lidar scanning measurement mode using VAD method could be substantially low without quality control. By investigating error sources in the scanning measurement mode, based on least square VAD fitting algorithm, a stepwise regression procedure for quality control of the data involved in wind regression was presented. The statistical parameters adopted for the quality control process included SNR, data residual, scanning interval effective data and the data efficiency. Based on the technique proposed, the quality control strategy was designed and verified by comparing the Lidar retrieved 2 955 pair of 10-minutes averaged wind data with those derived from the wind cup data. The result shows that the root mean square deviation (RMSD) of the wind speed has been reduced for approximately 44% from 0.97 m/s to 0.54 m/s, while the RMSD of wind direction has been reduced for approximately 26% from 7.47° to 5.55°.

Key words: VAD retrieval algorithm; coherent wind lidar; data quality control

收稿日期: 2017-08-06; 修订日期: 2017-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(40905005, 41375016)

作者简介: 王贵宁(1989-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达反演算法方面的研究。Email: 972015021@163.com

导师简介: 刘秉义(1980-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事大气和海洋激光探测方面的研究。Email: liubingyi@ouc.edu.cn

0 引言

相干多普勒测风激光雷达具有高时空分辨率和晴空探测等优点,已经成为目前风场测量的有效手段之一。相干多普勒测风激光雷达利用外差方式检测激光的多普勒频移来测量物体的运动速度,测量精度高,稳定性好。目前已在飞行安全^[1]、大气边界层探测^[2]、风能资源评估^[3]等领域得到应用。激光雷达扫描模式风廓线反演一般使用速度方位显示(Velocity-Azimuth Display, VAD)反演方法^[4],在假设水平风场均匀的条件下,使用 VAD 方法能够有效利用激光雷达测量的径向风速反演水平风场。这种方法不仅能给出详细的风场空间分布,它还可以给出雷达所在位置的风廓线以及水平风场形变等信息^[5]。但由于观测时的天气状况、设备系统误差及风场本身非均匀等诸多不可控因素的影响,不加区分地将所有测量数据点代入,VAD 拟合所得到的风廓线往往会存在较大误差。

在运用 VAD 方法前,有必要对雷达测量径向风速进行质量控制。Yamada 等人提出了在弧圈方向连续求解来解决径向速度偏差的问题^[6];Tabary 等人提出了利用径向速度沿方位角的导数和 Bayes 条件概率的方法来回避折叠速度误差^[7-8];Collins 根据误差特征把风归结为四种误差类型并且针对各误差类型制定了相应的质量控制方法^[9];朱丽娟等人将最优插值技术(OIQC)用于雷达 VAD 风廓线的反演^[10]。为了确保 VAD 方法反演风的可靠性,有一些研究者给出了 VAD 算法的适用标准。如 Holleman 要求雷达资料的体扫距离为 5~25 km,去除 2 m/s 的径向速度资料后,按照方位角分为 8 个扇区,每个扇区的数据点数不应少于 5 个^[11];陆大春等人要求同一高度上进行 VAD 拟合的风速数据点在一个圆周上应不少于 25 个,这些数据点要覆盖一定大小的扇形区域并且其风向离散度不能太大^[12];邵爱梅等人基于 VAD 算法的原理设置了高波项能量分量、相对离差、数据空缺的最大间隔、有效数据点数四个判据分析单判据对 VAD 风的好坏识别能力^[13]。但是对于相干测风激光雷达,这些数据质量控制方法是否有利于风场测量精度的提升,仍未有明确的答案。

文中首先分析了 VAD 反演算法中的误差来源,

针对不同的误差来源制定了信噪比、数据残差两个判据对数据奇异点进行筛选,进而设计了基于以上判据的 VAD 逐级拟合数据质量控制流程。在质量控制流程中设置了扫描区间有效数据和数据有效率两个判据对参与拟合的数据质量进行整体控制。为验证风速奇异点检测效果和质量控制流程对风速精度的影响,在实验数据分析中,首先分析了单圈 360°方位扫描测量模式下质量控制流程检测奇异点个例,进而又统计分析了连续 2 955 组 10 min 平均激光雷达测风数据与高精度风杯数据,最后得出结论。

1 数据质量控制方法

1.1 VAD 风场反演方法

相干测风激光雷达系统采用双轴转镜的三维扫描方式,可以进行定点风廓线扫描、不同仰角和方位角的立体扫描,其中平面位置显示(Plane Position Indicator, PPI)扫描测量模式是以雷达为中心,使用固定仰角连续改变方位角的圆锥扫描方式,其优点是实时、直观和目标特征明^[14]。PPI 扫描模式下利用 VAD 反演方法拟合计算反演水平风速、风向。VAD 反演方法基于水平风场均匀性假设,通过对 VAD 曲线做谐波分析,提取出水平风速、风向等风场信息,一次扫描过程就可完成对风场的反演。VAD 反演方法在计算时选取同一高度上的径向风速圈数据(半圆或扇形亦可)。这些数据是一系列正弦变化趋势的点,然后根据公式(1)对这些点进行正弦拟合得到一条正弦变化的曲线^[15]。

$$y=A \cdot \sin(x+\varphi) \quad (1)$$

式中: y 为不同方位角的径向风速; x 为方位角; A 为水平风速; φ 为风向。在作出拟合曲线后,读出的最大值 y'_{\max} 即为水平风速在径向上的分量,除以仰角的余弦得到该径向距离所在高度的风速,而该曲线上径向风速最小值 y'_{\min} 对应的横坐标值即为风向。

1.2 质量控制判据设计

上述激光雷达风场反演方法需基于风场的水平均匀性假设,但真实的大气环境中往往存在着一系列不确定的因素,如雨滴、雪、冰雹及其他固体大颗粒的影响、短期云层的干扰及大气风场本身存在的不确定性等,导致风场呈现非均匀性^[16]。从相干测风激光雷达的原理——大气气溶胶粒子的移动速度近

似于风的速度来看,在激光雷达实验观测时,大部分误差来自于多普勒频移的采集过程,在雷达的探测区域内雨滴、雪及其他固体大颗粒会对雷达的回波造成影响,这样就造成了数据奇异点的存在。另外,激光雷达硬件系统中暗电流及本振光和信号光中的散粒噪声客观存在,当系统噪声过高时,激光雷达采集原始数据点的精度会受到影响。因此,在实际观测中,为保证 VAD 拟合风速的准确性,参与拟合的观测数据点应至少考虑以下三个影响因素:

(1) 观测设备所采集原始数据点的精度,主要存在的问题是激光雷达设备系统噪声的引入;

(2) 观测数据点的离散程度,主要存在的问题是非线性风场径向风速实际观测数据和 VAD 反演算法假设条件之间的矛盾;

(3) 观测数据点所能覆盖到的区域大小、数据点的连续性以及在 VAD 圆周上参与拟合点的数量,主要存在的问题是 VAD 圆周上的数据缺失以及抑制噪声后的数据损失。

综上,制订了信噪比、数据残差、扫描区间有效数据、数据有效率四个判据来排除原始数据拟合所带来的偏差。

1.2.1 信噪比

相干多普勒激光雷达探测的信号包含有用回波信号和噪声信号,多普勒频移的测量精度主要取决于回波信号和噪声的比值。对于相干多普勒激光雷达系统性能和原始数据处理来说,接收回波信号时得到的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)是一个十分重要的性能指标^[17]。当激光在大气中传输时,由于大气衰减的影响,激光雷达接收到的回波信号信噪比随高度的增加而降低,信噪比不仅反映系统的探测能力和抗噪声能力,也影响相干测风数据反演的准确性。

在原始信号处理时,首先将快速傅里叶变换(FFT)谱数据平均并去背景噪声,以提高原始回波信号的信噪比^[18],同时硬件系统中利用声光调制器(Acoustic Optical Modulator,AOM)将弱中频信号提高到高频信号,去掉相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)的影响,从硬件层面提高信噪比^[19]。但电路中暗电流以及本振光和信号光中的散粒噪声仍然会影响风速反演的精度,因此在数据处理时去掉较低信噪比引起的非真实风速信号是数据质量控制的

关键。具体的方法是设定信噪比下限阈值,当计算信噪比低于设定的阈值时,认为此时信号已经不是真实风速信号,可以去除这些信号。但当信噪比过高时,仍然认为这些信号不是真实信号,此时激光器光束受到硬靶或人为干扰导致信噪比数据偏大,可以设置信噪比上限阈值,当计算信噪比高于设定值时,同样去除这些信号,保证最终信号的有效性。如图 1 所示为扫描测量中 1 km 处风速的拟合结果,实线为径向风速数据的拟合曲线,虚线为 SNR 数值,可见,当 SNR 值过低时,径向风速数值相对拟合线出现较大的偏离,同时 SNR 过高时,同样会有较大偏差的数据点出现。

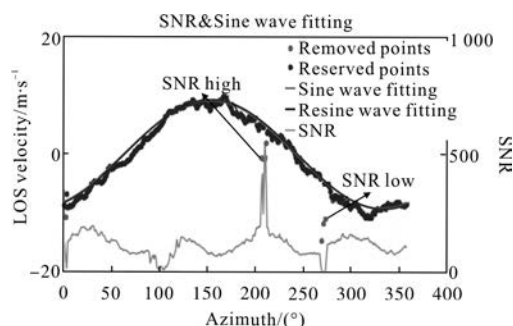


图 1 信噪比数值对径向风速的影响示意图(实线为正弦波的风速数据拟合曲线,虚线为信噪比值,实心圆点为信噪比控制前的原始径向风速的数据点)

Fig.1 Schematic of influence of SNR value on LOS velocity(solid line is the sine wave fitting with wind velocity data, dotted line is SNR value, solid dots is original LOS wind velocity data points before SNR control)

1.2.2 数据残差

在数理统计中残差定义为实际观测值与回归方程预测值之间的差,用 e 表示。残差 e 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 。残差分析是通过残差所提供的信息分析数据的可靠性、周期性或者其他干扰。在风速残差分析中,笔者将拟合曲线相同方位角下风速拟合值和风速实际测量值之间的差叫做风速残差,如公式(2)所示。使用风速残差可以很好反映数据拟合值与测量值之间的偏差。

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

式中: $V_o(\theta)$ 为各方位角 θ 下的实际观测径向风速值; $V_f(\theta)$ 为拟合风速值。

残差与残差标准差之间的比值,称为标准化残

差,用 ZRE 表示。标准化残差使残差具有可比性。标准化残差可以用公式(3)表示,其中 σ 为残差标准偏差。 ZRE 服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 。实验点的标准化残差落在 $(-2, 2)$ 区间以外的概率 ≤ 0.05 。若某一实验点的标准化残差落在 $(-2, 2)$ 区间以外,可在 95% 置信度将其判为异常实验点,不参与回归线拟合。

$$ZRE_i = \frac{V_A(\theta_i) - V_o(\theta_i)}{\sigma}, i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

在 VAD 反演算法中,可以使用残差检测异常值和有影响的观测值,如果某一个数据点与其他数据点所呈现的趋势不相吻合,这个点就有可能是异常点。如果某一个观测值所对应的标准化残差较大,就可以识别为异常值。一般情况下,当一个观测值所对应的标准化残差绝对值大于 2 时,可以将其视为异常值。

图 2 为使用数据残差检测奇异点示意图,黑色点为使用 VAD 逐级拟合方法流程结束后的保留点,矩形框标出点为质量控制流程的去除点,原始拟合曲线(Sine)、风杯风速曲线(此处使用风杯作为定标工具 Standard)及去除奇异点后重新拟合的曲线(Resine)如图中箭头标注所示,底部曲线为标准化残差值(ZRE)。从图中可以看出,使用标准化残差值可以有效检测数据中偏移较大的数据奇异点,重新拟合后曲线更加靠近真实曲线。

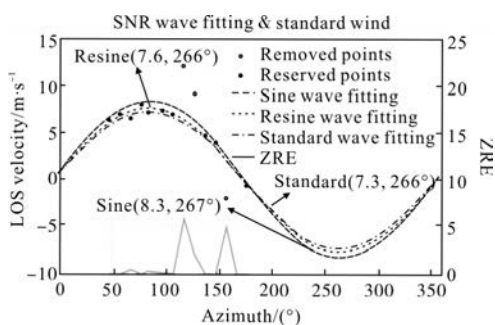


图 2 残差检测奇异点示意图(原始拟合线(Sine)、风杯风速曲线(Standard)及去除奇异点后重新拟合线(Resine)在图中使用箭头标注,底部曲线为 ZRE 值,矩形框标出点为数据奇异点,未标注点为正常数据点)

Fig.2 Schematic of residual detecting singularity data(original fitting curve(Sine), standard wind velocity curve by wind cup, the fitting curve after removed singularity data(Resine) and the fitting curve are marked by arrows. The line in bottom is ZRE value, the points in rectangle box are singularity data, the unlabeled point is the normal data point)

1.2.3 扫描区间有效数据

扫描区间有效数据包括区间有效数据点数、区间最大覆盖角度两个参数,它们关系到数据拟合时傅立叶系数的估算精度,对数据拟合精度起到至关重要的作用。在 VAD 方法反演水平风时,若观测数据不存在误差,观测数据覆盖方位角高于 80° 即可得到精确的模拟风场,但观测数据偏差客观存在, Yamada 等通过数值模拟实验表明:当存在 1 m/s 的风速随机误差时,观测数据覆盖方位角需高于 130° 才能拟合得到精确的水平风场。如果风场非线性变化,这时观测数据方位角需求将达到 160° ^[6]。如图 3 所示,实线为拟合水平风速的大小,横坐标为激光雷达扫描区间覆盖最大角度范围,从图中可以看出当方位角覆盖角度高于 130° 时,风速拟合值趋于稳定。在实际的数据处理中,通过对大量激光雷达实测数据统计分析同样验证了上述结论,因此在数据质量控制流程中当参与拟合角度覆盖低于 130° 时,该组数据不参与拟合计算。当数据达到方位角覆盖要求时,将径向风速数据按照方位角分为 8 个扇区,每个扇区的数据点数应不少于 5 个^[11]。如图 4 所示,在质

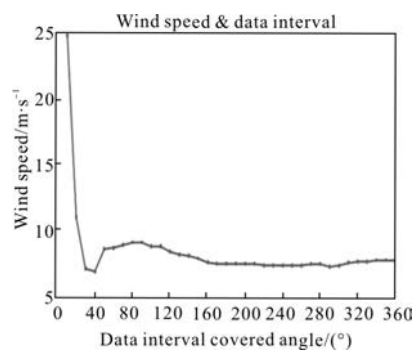


图 3 拟合风速值随区间最大覆盖角度的变化示意图

Fig.3 Schematic of wind speed varies with data interval maximum covered angle

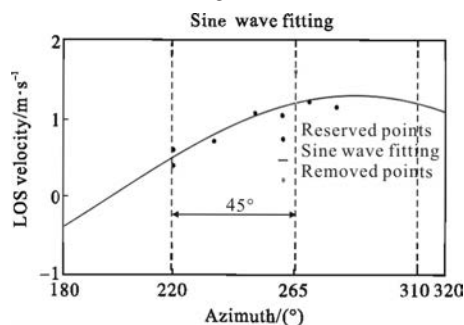


图 4 区间有效数据点数示意图

Fig.4 Schematic of interval valid data points

量控制流程后,220°~280°扫描范围内,点数不应少于 6 个。在实际的数据处理中,经质量控制过后的某扇区点数已不足 5 个,证明该扇区数据质量整体偏差,去除该扇区数据后,使用剩余数据点已很难满足数据有效率使用要求,因此当扇区点数不足 5 个时,该组数据不参与拟合。

1.2.4 数据有效率

数据有效率定义为质量控制过后数据点数占观测数据点数的比值。经过质量控制后,有时虽数据整体线性程度较好,无数据奇异点,可以满足数据拟合的需求,但是相对于观测数据所占比例已经大幅降低,这时继续进行数据拟合将无法拟合到真实的风速数值,此时使用数据有效率可以排除质量控制流程对数据拟合精度的影响。数据有效率一般认为经过质量控制流程后应至少包含原有数据的 80%。

1.3 VAD 逐级拟合质量控制流程

质量控制的目的在于在原始径向风速中提取具有简谐特征的有效数据点,对于正弦曲线来说,最重要的是相位和振幅,总体的质量控制要求是在确保相位的前提下,逐步筛选出用于数据拟合的径向速度数据。在流程图 5 中,首先径向风速数据点需要进行数据有效性过滤,该流程主要排除数据缺测所造成的拟合数据点数不足的情况,紧接着剔除信噪比偏大或偏小的径向风速数据点,这些数据点往往被

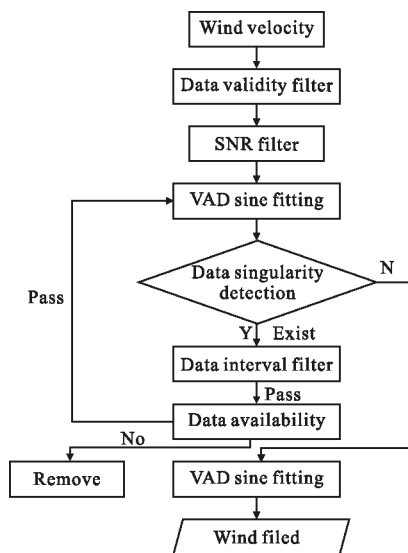


图 5 质量控制流程图

Fig.5 Flow chart of quality control

认为是数据噪声点,接下来进行数据奇异点检测,具体流程为通过 VAD 方案拟合出正弦曲线,计算出风速标准化残差,并将其作为质量控制的基础,确定质量控制门限阈值,并将超过门限阈值的数据点剔除,之后进行扫描区间有效数据和数据有效率检测,如果满足数据使用要求,再次进行 VAD 拟合,这样将数据逐级拟合,使所有数据满足奇异点检测需求。在数据中已不存在奇异点的前提下,再使用保留的数据点进行 VAD 拟合,最终得到水平风速、风向。

2 实验数据分析

2.1 实验及系统概况

文中述及激光雷达为青岛航天海鹰环境科技有限公司研发的相干测风激光雷达系统 WindPrint S4000,它是一种小型、全自动、无环境电磁干扰的相干多普勒激光雷达,可实现大气边界层或低空对流层大气三维风场的高精度机动测量,目前已在飞机尾涡探测、风能资源评估、大气边界层探测等多个领域得到了应用^[20-24]。其径向风速测量精度达到了 ± 0.1 m/s,风向测量精度达到了 $\pm 0.1^\circ$,可以测量周围地面环境的风速、风向、温度、湿度、大气压力等参数,可自定义 190 个高度层数,课题组进行实验设定的测量分辨率为 30 m。为检验数据质量控制效果,在此对比分析工具选择了符合 IEC 61400-12-1 标准^[25]的高精度风杯,它包含 80 m 高度处 A100L2 风速测量仪与 78 m 高度处 W200P 风标,风速测量精度 ± 0.01 m/s,风向测量精度 $\pm 0.1^\circ$ 。

实验观测期间,激光雷达相对风杯位置如图 6 所示,激光雷达置于距风杯水平距离 266 m,垂直距离 130 m 处,仰角为 20.77°。对比印证实验共持续 43 天,

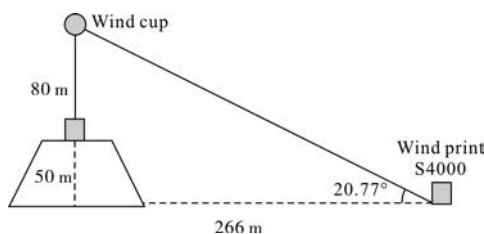


图 6 激光雷达与风杯相对位置示意图

Fig.6 Schematic of relative position of lidar and wind cup

对秒级数据进行有效性过滤后平均处理, WindPrint S4000 共获得 2 955 组 10 min 平均数据, 风杯提供了实验期间完整的 10 min 平均风速、风向数据。

2.2 实验数据分析

将激光雷达 WindPrint S4000 设置为 PPI 高密度扫描模式, 单次扫描角度 1°, 单圈实现 360° 方位角完整扫描, 共获得 360 组不同高度的径向风速数据。将 1 km 高度处径向风速数据带入质量控制流程进行 VAD 逐级拟合。如图 7 所示, 五角虚线为 SNR 数据值, 坐标原点处五角实线为 ZRE 值, 所去除数据奇异点使用矩形框标出, 在图中可以看出当 SNR < 20 时, 数据点出现较大偏移, 但仅仅使用 SNR 阈值无法检测所有奇异点, 此时再次使用 ZRE > 2 这一阈值可以检测相对于拟合值偏差较大的点。将这些数据点过滤后, 剩余 336 个数据点, 满足数据有效率 80% 要求, 且满足扫描区间有效数据要求。将剩余数据点重新拟合后(黑色线)风速为 8.8 m/s, 更加靠近风杯风速值(8.7 m/s)。

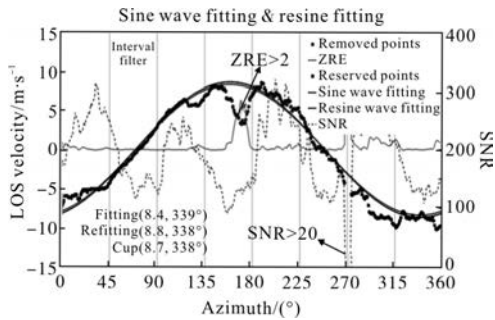


图 7 单次扫描测量数据质量控制(五角虚线为 SNR 数据值, 坐标原点处五角实线为 ZRE 值, 所去除数据奇异点使用矩形框标出)

Fig.7 Single scanning measurement data quality control (the pentagonal dotted line is the SNR value, the pentagonal solid line at the origin of the coordinate is the ZRE, the singularities of the removed data are marked with rectangular frame)

图 8、9 展示了激光雷达风速与风杯风速在质量控制流程前后的统计对比结果。图 8 为将原始径向风速做数据有效性过滤, 使用传统 VAD 方法拟合并做 10 min 平均处理, 与风杯数据做对比统计结果。图 9 为加入了 VAD 逐级拟合质量流程之后的统计结果。横坐标为风杯风速, 纵坐标为激光雷达风速, 拟合

直线 $y=ax+b$ 和 $y=ax$ 分别是含截距和过原点的线性拟合效果。从散点图可以看出, WindPrint S4000 经质量控制流程后, 数据质量有了很大提升, 风速线性回归的斜率接近于 0.99, 风速截距为 0.11 m/s, 质量控制流程后共有 1 980 组数据点, 风速点数损失 33%, 风速均方根误差降低到 0.54 m/s, 风速对比偏差降低约 44%。

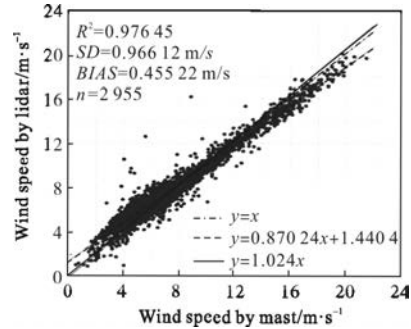


图 8 质量控制流程前风速统计结果(未经过原点直线为散点使用 $y=ax+b$ 的拟合结果, 经过原点直线为散点使用 $y=ax$ 的拟合结果, 实心圆点为风杯和激光雷达对应的风速点)

Fig.8 Wind speed statistics before quality control(straight line without going through origin of the axis is the fitting line by $y=ax+b$, through origin of the axis line is the fitting line by $y=ax$, solid dots is the speed of wind cup and lidar)

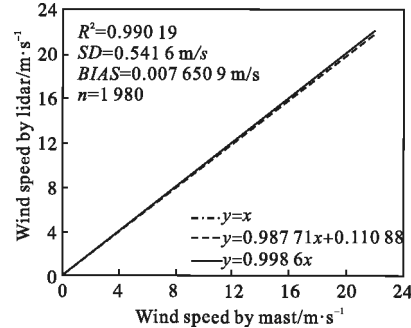


图 9 风速质量控制后统计结果

Fig.9 Wind speed statistics after quality control

为了规避小风速及风向过零问题对风向统计带来的影响, 在风向数据平均时, 使用了风速、风向矢量平均方法^[25]。图 10、11 为风向数据在质量控制前后与风杯数据对比的统计结果。从图中可以看出, 经质量控制流程后风向数据离散点得到了很好的滤除, 风向均方根误差降为 5.54°, 对比偏差降低约 26%。

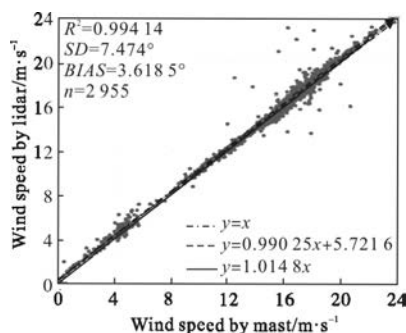


图 10 质量控制流程前风向统计结果

Fig.10 Wind direction statistics before quality control

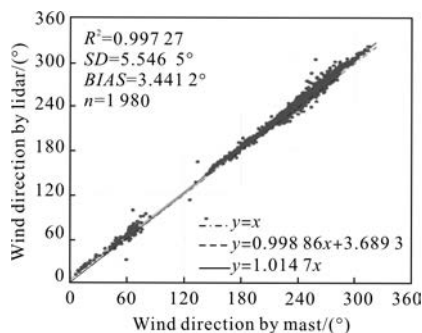


图 11 质量控制流程后风向统计结果

Fig.11 Wind direction statistics after quality control

3 结 论

在相干测风激光雷达扫描测量模式下使用 VAD 方法反演风速时,使用信噪比、数据标准化残差可以有效检测扫描测量中的数据奇异点并提高重新拟合后的风速数据精度,通过对激光雷达 2 955 组 10 min 平均实测数据分析,在经逐级拟合 VAD 质量控制流程后,风速均方根偏差从 0.97 m/s 降低到 0.54 m/s,对比偏差降低约 44%,风向均方根偏差从 7.47°降低到 5.55°,对比偏差降低约 26%,证明 VAD 逐级拟合质量控制流程可以有效提高相干测风激光雷达反演数据精度。

致谢

感谢峰能可再生能源科技有限公司的 Daniel Gallacher 提供风杯同步观测数据,及庄全凤对论文版面格式语句提供的帮助。

参考文献:

[1] Dolfi-Bouteyre A, Augere B, Valla M, et al. Aircraft wake vortex study and characterization with 1.5 μm fiber Doppler lidar[J]. *Aerospace Lab*, 2009(1): 1-13.

[2] Kunkel K E, Eloranta E W, Shipley S T. Lidar observations of the convective boundary layer [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16(12): 1306-1311.

[3] Iungo G V, Wu Y T, Portéagel F. Field measurements of wind turbine wakes with lidars [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2013, 30(2): 274-287.

[4] Browning K A, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar [J]. *J Appl Meteor*, 1968, 7(1): 105-113.

[5] Li L I, Wang C Z, Xie Y F, et al. Wind field inversion technique for scanning wind lidar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 251-258.

[6] Yamada Y, Chong M. Vad -based determination of the nyquist internal number of Doppler velocity aliasing without wind information [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1999, 77(2): 447-457.

[7] Tabary P, Scialom G, Germann U. Real-time retrieval of the wind from aliased velocities measured by Doppler radars[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2001, 18(6): 875-882.

[8] Tabary P, Petitdidier M. Application of a bayesian wind profile retrieval technique to radar data collected in the alpine southern upslope region and comparison with upstream wind profiler measurements [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2002, 19(6): 875-887.

[9] Collins W G. The quality control of velocity azimuth display (VAD) winds at the national centers for environmental prediction[EB/OL].[2001-06-20]. <http://www.emc.noaa.gov/mmb/papers/Collins/preprints/vadqc.htm>.

[10] Zhu Lijuan, Gong Jiandong. A study on application to velocity dealiasing of Doppler radar VAD profile data [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(5): 862-869. (in Chinese)
朱立娟, 龚建东. OIQC 技术在雷达反演 VAD 廓线资料退模糊中的应用研究[J]. *高原气象*, 2006, 25(5): 862-869.

[11] Holleman I. Quality control and verification of weather radar wind profiles [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, 22(22): 1541-1550.

[12] Lu Dachun, Jiang Nianchong. Application of products based on VAD technique to nowcasting [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(S1): 156-160. (in Chinese)
陆大春, 蒋年冲. VAD 有关产品在临近预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(S1): 156-160.

[13] Shao Aimei, Qiao Xiaoshi, Qiu Changcheng, et al. Criteria of quality control for VAD winds [J]. *Journal of Lanzhou*

- University (Natural Sciences)*, 2009, 45(5): 57–62. (in Chinese)
邵爱梅, 乔小湜, 邱崇践. VAD 技术反演水平风廓线的质量控制标准[J]. 兰州大学学报(自科版), 2009, 45(5): 57–62.
- [14] Yin Jiaping. Research and observation of turbine wake and wind field of MABL by coherent Doppler wind lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)
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.
- [15] Liu Bingyi. Performance optimization and wind field retrieval for mobile wind lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese)
刘秉义. 车载测风激光雷达性能优化和风场反演 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [16] Huang Min. Research on nonlinear VAD method of continuous coherent wind lidar [D]. Chengdu: Chengdu Technology University, 2012. (in Chinese)
黄敏. 连续相干激光测风雷达非线性 VAD 方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [17] Yang Yanling, Li Yanchao, Gao Long, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1918–1922. (in Chinese)
杨彦玲, 李彦超, 高龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1918–1922.
- [18] Frehlich R. Simulation of coherent Doppler lidar performance in the weak-signal regime [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, 13(3): 646–658.
- [19] Wang Xitao. The research of all-fiber laser heterodyne detection for velocity measurement [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese)
王希涛. 全光纤激光相干测速技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [20] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720–1724. (in Chinese)
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1720–1724.
- [21] Wu S, Liu B, Liu J, et al. Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): A762.
- [22] Wu S, Liu B, Liu J. Aircraft wake vortex measurement with coherent Doppler lidar[C]//European Physical Journal Web of Conferences, 2016: 14008.
- [23] Wu S, Yin J, Liu B, et al. Observations of wind profile of marine atmosphere boundary layer by shipborne coherent Doppler lidar [C]// The 27th International Laser Radar Conference, 2016, 119: 06017.
- [24] Wu S, Yin J, Liu B, et al. Wind turbine wake visualization by Doppler lidar [C]//Optics and Photonics for Energy and the Environment, 2015: EM3A.4.
- [25] Zeng Shuer. The vector mean method of wind [J]. *Meteorological*, 1983, 9(6): 21–22. (in Chinese)
曾书儿. 风速风向的矢量平均方法 [J]. 气象, 1983, 9(6): 21–22.