

相干多普勒激光雷达风场反演方法研究与实验印证

冯长中, 吴松华, 刘秉义

中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 提出基于共轭梯度算法的速度方位显示(VAD)风场反演方法,应用最优化理论,将共轭梯度算法代替传统VAD方法中的傅里叶级数展开来求取最优解,并针对算法在风场反演应用时存在不收敛于最优解的问题,使用Hessian矩阵对算法进行了修正。同时开展了多普勒激光雷达与符合IEC 61400-12-1国际标准的高精度风杯风速计的43天对比实验,结果显示,当激光雷达的方位角扫描范围为 60° 、径向个数为7个时,两者的风速、风向相关系数分别为0.991和0.998,风速、风向标准偏差分别为0.52 m/s和 5.1° ,风速、风向偏差分别为 -0.02 m/s和 3.6° 。对比实验结果表明,基于共轭梯度算法的VAD风场反演方法使用较小的扫描方位角仍能保证其测量的准确性满足国际标准,具有更强的适用性,同时印证了激光雷达系统的测量性能,为动态复杂风场的监测提供了更佳的选择。

关键词 遥感; 多普勒激光雷达; 速度方位显示; 风场反演方法; 共轭梯度

中图分类号 TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0410001

Research on Wind Retrieval Method of Coherent Doppler Lidar and Experimental Verification

Feng Changzhong, Wu Songhua, Liu Bingyi

College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract A velocity azimuth display (VAD) wind retrieval method based on conjugate gradient algorithm is proposed, in which the conjugate gradient algorithm is used to replace the solution of Fourier series expansion in original VAD method by using optimization theory. In order to solve the problem that the algorithm does not converge to the optimal solution in wind retrieval, the Hessian matrix is used to modify the algorithm. At the same time, a synchronous comparison experiment had been carried out with Doppler lidar and standard wind cup anemometer in accord with IEC 61400-12-1 international standards for 43 days. The results show that, when the azimuth scanning range and radial number of lidar are 60° and 7 respectively, the correlation coefficients of wind speed and wind direction are 0.991 and 0.998, the standard deviations of wind speed and wind direction are 0.52 m/s and 5.1° , the deviations of wind speed and wind direction are -0.02 m/s and 3.6° . The results of comparison experiment prove that the VAD wind retrieval method based on conjugate gradient algorithm can guarantee the measurement accuracy to meet international standard in case of low azimuth scanning range with strong applicability. Meanwhile, the measurement performance of lidar system is confirmed, which provides a better choice for the monitoring of dynamic complex wind field.

Key words remote sensing; Doppler lidar; velocity azimuth display; wind retrieval method; conjugate gradient

OCIS codes 280.3340; 010.3640; 010.0280; 030.1640

收稿日期: 2017-10-16; 收到修改稿日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(41375016, 41471309)、国家重点研发计划(2016YFC1400904)、国家863计划(2014AA09A511)

作者简介: 冯长中(1987—),男,博士研究生,主要从事激光遥感技术、机器学习以及大气环境监测应用等方面的研究。
E-mail: changzhong606@163.com

导师简介: 吴松华(1976—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光遥感技术及其海洋大气动力学和环境监测应用方面的研究。E-mail: wush@ouc.edu.cn(通信联系人)

1 引言

相干多普勒激光雷达已经成为目前大气风场遥感探测的重要设备之一,其能够高时空分辨率、高精度地探测大气三维风场。多普勒激光雷达直接测量的是径向速度,通过一定的风场反演方法将径向速度反演成风速、风向。速度方位显示(VAD)技术是一种基于单部多普勒激光雷达和同一高度水平风场均匀假设条件的风场反演方法。通常情况下,多普勒雷达^[1-2]以固定仰角扫描 360°方位角范围来测量径向速度,力求保证风场反演时的需求^[3-4]。较大的方位角扫描范围对系统工作视野范围要求较高且不利于复杂地形条件下的风场测量,因此适用性较差;同时,较大的空间扫描范围对风场均匀的空间假设条件支撑较弱,会影响风场反演的风速、风向的精度。可见,上述问题限制了系统对于复杂风场的监测能力。

针对方位角扫描范围的问题,一方面一些研究者在微波天气雷达方面的研究成果可以为激光雷达提供参考,这是因为多普勒激光雷达风场探测模式和反演方法主要源于微波天气雷达,利用 VAD 方法进行风场反演时二者的时空约束条件以及数据处理方法相通,两种方法是在不同的探测机理上共同发展并相互借鉴。基于天气雷达的 VAD 风场反演方法中,一般使用傅里叶级数展开求解的方式来求解风速、风向,在保证其准确性的前提下尽可能降低方位角扫描范围,这方面的工作主要有:Yamada 等^[5]通过数值实验分析要求天气雷达的方位角扫描范围不低于 130°;另外,针对质量较差的数据点会给测量结果引入较大误差的问题,相关研究人员还研究了数据质量控制方法^[6-7]。另一方面在激光雷达中普遍还是使用 360°方位角扫描范围,如:德国空间中心(DLR)Weissmann 等^[8]使用机载相干多普勒激光雷达的 360°方位角范围内的 24 个径向风速进行风场反演;上海光学精密机械研究所刁伟峰等^[9]采用 360°方位角范围内的对称的 8 个径向风速进行风速测量;鲁东大学李志刚等^[10]利用机载相干多普勒激光雷达扫描圆周上的 8 个方向上的径向速度进行风场反演。可见,上述研究没有很好地解决方位角扫描范围影响方法适用性的问题。

在激光雷达应用中,目前普遍使用非线性最小二乘法代替现有的傅里叶级数展开的方法^[9]。如牛顿-高斯最小二乘法和 Levenber-Marquardt(LM)最小二乘法;牛顿-高斯最小二乘法会出现算法不收敛

的问题^[11],导致收敛速度和精度难以达到应用要求^[12];LM 最小二乘法收敛速度更快,但是该方法对初始值依赖较大,当初始值远离最优解会出现收敛速度慢甚至不收敛的问题^[11]。目前这些非线性最小二乘法在 VAD 风场反演中应用时存在算法收敛速度较慢甚至不收敛等问题,影响了风场反演的准确性,并限制了此方面研究成果的应用。

此外,为了印证方法的准确性以及多普勒激光雷达的测量能力,相关研究人员开展了多普勒激光雷达与其他风场测量技术的同步对比实验方面的相关研究,2012 年潘静岩等^[13]开展了相干多普勒激光雷达与高塔上 103 m 高度上的超声波风向风速仪的对比实验,对比时长为 7 天,结果发现风速相关系数为 0.952,风向相关系数为 0.986;2015 年上海光学精密机械研究所^[9]将研制的相干多普勒激光雷达与风廓线雷达进行比较,实验持续 4 h,得到的风速、风向相关系数分别为 0.988 和 0.941。现有研究中开展的对比印证实验一定程度上能够说明激光雷达的测量能力。但是,在印证方法准确性和测量效率方面缺乏和符合国际标准的风速、风向测量仪的足够时长的对比印证,还不足以证明方法的有效性,说服力不够强。

基于当前研究状况,本文选取最优化理论,利用共轭梯度算法代替传统 VAD 风场反演方法中复杂的傅里叶级数展开算法进行最优解的求解;针对共轭梯度算法在风场反演应用时不收敛于最优解的问题,提出使用目标函数 Hessian 矩阵修正算法;进一步开展了相干多普勒激光雷达与符合 IEC 61400-12-1(国际电工委员会,2014 年)国际标准的风杯风速计的时长为 43 天的对比实验,通过对实验结果的分析印证本文方法的有效性。

2 VAD 风场反演方法原理

VAD 风场反演方法是基于单部多普勒激光雷达固定仰角变方位角的扫描测量模式,对相同距离圈上的径向速度进行等间隔采样。激光雷达系统测量的径向速度 V_r 随激光方位角 β 的变化关系为:

$$V_r = u \sin \beta \cos \varphi + v \cos \beta \cos \varphi, \quad (1)$$

式中 u 、 v 分别表示实际大气风场的东西、南北方向上的速度分量, β 表示测量时激光指向的方位角, φ 为激光指向的仰角。根据水平风场线性分布的假设,可将 u 、 v 风速分量在扫描中心点位置进行一阶泰勒展开:

$$\begin{cases} u(x, y) = u_0 + u_x \cdot x + u_y \cdot y \\ v(x, y) = v_0 + v_x \cdot x + v_y \cdot y \end{cases}, \quad (2)$$

式中 u_0, v_0 表示中心点位置两个水平风分量; u_x, v_x 分别是 u, v 分量在 x 方向上的一阶偏导; u_y, v_y 分别是 u, v 分量在 y 方向上的一阶偏导。扫描点距离激光雷达的距离设为 r , 可得位置坐标:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \beta \cos \varphi \\ y = r \cdot \sin \beta \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

(1)式中径向速度 V_r 是方位角 β 的函数, VAD 方法中傅里叶级数展开时只考虑阶数不大于 2 的情况, 可以表示为:

$$V_r = a_1 \sin \beta + b_1 \cos \beta + a_2 \sin(2\beta) + b_2 \cos(2\beta), \quad (4)$$

式中 a_1, b_1 和 a_2, b_2 分别表示傅里叶级数展开的一阶和二阶系数, 在 VAD 方法中 a_1, b_1 用来计算风速、风向, a_2, b_2 用来计算形变的面积, 将(2)和(3)式代入(1)式, 并与(4)式比较, 可得:

$$\begin{cases} a_1 = u_0 \cos \varphi \\ b_1 = v_0 \cos \varphi \end{cases} \quad (5)$$

进一步利用傅里叶级数展开后的一阶系数, 可以得到大气风场在东西、南北方向上的风速分量 u_{mean} 和 v_{mean} :

$$\begin{cases} u_{\text{mean}} = \frac{a_1}{\cos \varphi} \\ v_{\text{mean}} = \frac{b_1}{\cos \varphi} \end{cases} \quad (6)$$

最后, 可反演求解得到三维风场的风速 V 、风向 Θ :

$$V = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} / \cos \varphi, \quad (7)$$

$$\Theta = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{a_1}{b_1}\right), & b_1 > 0 \\ \frac{3\pi}{2} - \arctan\left(\frac{a_1}{b_1}\right), & b_1 < 0 \end{cases} \quad (8)$$

3 基于共轭梯度算法的 VAD 风场反演方法

3.1 径向速度预处理

由于观测天气状况以及激光光束受到障碍物的干扰, 导致多普勒激光雷达测量的径向速度误差较大。如果不加区分地代入风场反演方法中, 会引起反演误差较大的问题。因此, 根据信噪比(SNR)对径向速度进行筛选, 称之为预处理。本研究设置 SNR 的上下限阈值分别去除受障碍物和回波信号衰减异常影响的径向速度: 首先, 由于实验期间雨天

的影响, 导致激光在大气传输中衰减增大, 系统接收到的回波信号 SNR 降低, 测量径向速度的误差随之增加, 因此设置 SNR 下限以剔除信号衰减异常所造成测量精度较低的径向风速; 其次, 障碍物等干扰导致 SNR 异常增大, 而测量的径向速度已经不是真实风速分量。本研究参考中国海洋大学王贵宁等^[14]的操作方法完成预处理过程, 尽可能排除外界因素对反演结果的影响。

3.2 基于最优化理论的模型建立

共轭梯度法是最常用的求解最优化问题的算法之一, 具有计算所需存储量小(与梯度下降算法相当)、稳定性高、收敛性好等显著优点。因此, 本研究将傅里叶级数展开提取风速、风向的方法转化为最优化问题, 利用共轭梯度算法进行求解。将(1)式模型变为:

$$h_\theta(\beta) = \theta_2 \cdot \sin\left(\beta + \frac{3\pi}{2} - \theta_1\right), \quad (9)$$

式中参数 θ_1 和 θ_2 分别表示与风向、风速相关的参数。通常求解 θ_1 和 θ_2 的方式是使测量值与模型的误差平方和的均值最小:

$$J(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m [h_\theta(\beta_i) - V_{r,i}]^2, \quad (10)$$

也就是最小二乘法法则, 其中下标表示测量的第 i 个径向。风向、风速可以用参数 θ_1 和 θ_2 来计算:

$$\Theta = \begin{cases} \frac{\theta_1 \cdot 180}{\pi}, & \theta_2 \geq 0 \\ \frac{\theta_1 \cdot 180}{\pi} + 180, & \theta_2 < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$V = \frac{|\theta_2|}{\cos \varphi}. \quad (12)$$

3.3 基于共轭梯度算法的模型求解

本研究使用共轭梯度算法求解(10)式的最优解, 以代替傅里叶级数展开提取风速、风向的方法。本节包括基于共轭梯度算法的 VAD 风场反演方法原理、算法的主要分类、算法修正以及方法流程 4 部分内容。

首先, 共轭梯度是一种迭代算法。在算法开始时随机初始化参数 θ_1 和 θ_2 , 设置算法迭代终止的阈值 $\epsilon > 0$ 。然后利用共轭梯度算法迭代更新参数 θ_1 和 θ_2 取值, 使参数 θ_1 和 θ_2 向最优解迭代, 具有以下迭代形式:

$$\begin{bmatrix} \theta_1^{k+1} \\ \theta_2^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1^k \\ \theta_2^k \end{bmatrix} + \alpha_k \mathbf{d}_k, \quad (13)$$

式中 k 表示迭代次数, α_k 和 \mathbf{d}_k 分别表示在第 k 次迭代运算的步长和搜索方向:

$$\alpha_k = \frac{-\mathbf{g}_k^T \mathbf{d}_k}{\mathbf{d}_k^T \mathbf{G} \mathbf{d}_k}, \quad (14)$$

$$\mathbf{d}_{k+1} = -\mathbf{g}_{k+1} + \beta_{k+1} \mathbf{d}_k, \quad (15)$$

式中 \mathbf{g} 表示目标函数 $J(\theta_1, \theta_2)$ 的一阶偏导矩阵,也叫雅可比矩阵; \mathbf{G} 表示目标函数 $J(\theta_1, \theta_2)$ 的二阶偏导矩阵,也叫 Hessian 矩阵,两者的公式如下:

$$\mathbf{g}(\theta_1, \theta_2) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial J(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}^T, \quad (16)$$

$$\mathbf{G}(\theta_1, \theta_2) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial \theta_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 J}{\partial \theta_2^2} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

相邻两次迭代运算梯度值的差记为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k, \quad (18)$$

其次,根据参数 β 计算方式的不同,主要有以下 7 种代表性的共轭梯度算法^[15-21]:

$$\beta_{k+1}^{\text{HS}} = \frac{\mathbf{g}_{k+1}^T \mathbf{y}_k}{\mathbf{d}_k^T \mathbf{y}_k}, \quad (19)$$

$$\beta_{k+1}^{\text{PRP}} = \frac{\mathbf{g}_{k+1}^T (\mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k)}{\|\mathbf{g}_k\|^2}, \quad (20)$$

$$\beta_{k+1}^{\text{FR}} = \frac{\mathbf{g}_{k+1}^T \mathbf{g}_{k+1}}{\mathbf{g}_k^T \mathbf{g}_k}, \quad (21)$$

$$\beta_{k+1}^{\text{CD}} = \frac{\|\mathbf{g}_{k+1}\|^2}{-\mathbf{d}_k^T \mathbf{y}_k}, \quad (22)$$

$$\beta_{k+1}^{\text{LS}} = \frac{\mathbf{g}_{k+1}^T \mathbf{y}_k}{\mathbf{d}_k^T \mathbf{g}_k}, \quad (23)$$

$$\beta_{k+1}^{\text{DY}} = \frac{\|\mathbf{g}_{k+1}\|^2}{-\mathbf{d}_k^T \mathbf{y}_k}, \quad (24)$$

$$\beta_{k+1}^{\text{MHS}} = \frac{\|\mathbf{g}_{k+1}\|}{\|\mathbf{g}_k\|} \beta_{k+1}^{\text{HS}} + \left(1 - \frac{\|\mathbf{g}_{k+1}\|}{\|\mathbf{g}_k\|}\right) \beta_{k+1}^{\text{DY}}. \quad (25)$$

上述 7 种共轭梯度算法的主要区别在于,当目标函数是二次函数时,算法是等效的;但是,当目标函数为其他非线性函数时,算法的区别较大,主要体现在算法收敛所需的迭代次数差别较大。本研究将在分析讨论部分给出 7 种算法的对比结果。

再次,一般共轭梯度算法将导数为 0 的点判断为极值点,也就是如果存在某个常数 δ ,使得以 (θ_1^*, θ_2^*) 为中心、 δ 为半径的圆内的其他所有点 (θ_1, θ_2) 都满足 $J(\theta_1, \theta_2) \geq J(\theta_1^*, \theta_2^*)$,那么 (θ_1^*, θ_2^*) 是函数 $J(\theta_1, \theta_2)$ 的局部极小值点。对于连续、可微的函数 $J(\theta_1, \theta_2)$,如果 $J(\theta_1, \theta_2)$ 在点 (θ_1^*, θ_2^*) 的邻域内连续可微,则有:

$$\mathbf{g}(\theta_1^*, \theta_2^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial J(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T. \quad (26)$$

三种常用的导数为 0 的点的判断条件有:

- 1) 自变量变化充分小:
 $\|[\theta_1^{k+1} - \theta_1^k, \theta_2^{k+1} - \theta_2^k]\| < \epsilon$;
- 2) 函数值变化充分小:
 $\|J(\theta_1^{k+1}, \theta_2^{k+1}) - J(\theta_1^k, \theta_2^k)\| < \epsilon$;
- 3) 梯度值变化充分小:
 $\|\mathbf{g}(\theta_1^{k+1}, \theta_2^{k+1}) - \mathbf{g}(\theta_1^k, \theta_2^k)\| < \epsilon$.

共轭梯度算法直接应用在风场反演时会出现不收敛于局部最优解的问题。这是因为导数为 0 的点不一定是局部最优解,也有可能是鞍点。鞍点既不是函数的极大值点,也不是函数的极小值点。物理上表现为在一个方向是极大值点,而在另一个方向是极小值点。Hessian 矩阵是多元函数的二阶偏导数构成的方阵,有效地描述了函数的局部曲率,其正定性可有效消除鞍点的影响。因此,本研究应用 Hessian 矩阵修正共轭梯度算法,进一步判断是否为局部最优解。如果 Hessian 矩阵的特征值都为正且目标函数 $J(\theta_1, \theta_2)$ 的导数为 0,那么该点是局部最优解。如果特征值既有正也有负且目标函数导数为 0,那么该点是鞍点,不是局部最优解,此时需要再次初始化参数 θ_1 和 θ_2 并重新迭代,直到收敛于局部最优解为止。

接下来,根据局部最优解求解全局最优解。局部最优解是全局最优解的必要不充分条件,而且求解目标函数的全局最优解的难度较大。但是,对于本研究的目标函数 $J(\theta_1, \theta_2)$ 而言,其为是周期函数,虽然有无数个局部最优解,根据周期函数的特点可以知道每个局部最优解都是等效的全局最优解。如图 1 所示,在参数 θ_1 和 θ_2 的一定取值范围内,函

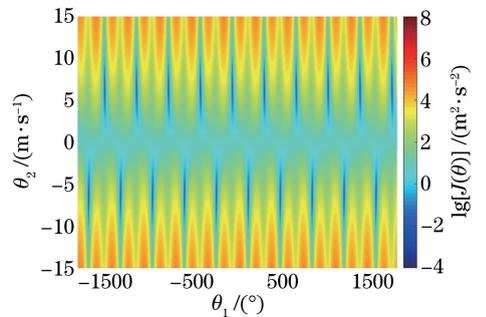


图 1 函数 $J(\theta_1, \theta_2)$ 随参数 θ_1 和 θ_2 变化关系示例
 Fig. 1 An example of the variance of function $J(\theta_1, \theta_2)$ with parameter θ_1 and θ_2

数 $J(\theta_1, \theta_2)$ 局部极小值点的分布具有周期性特点, 且每个局部最优解是全局最优解。因此, 在本方法中求解的局部最优解就是全局最优解。

最后, 给出基于共轭梯度算法的 VAD 风场反演方法流程设计(图 2), 阈值 ϵ 设置为 10^{-5} , 参数 θ_1 和 θ_2 随机初始化。当算法收敛退出时, 根据最后得到参数 θ_1 和 θ_2 进一步计算风速、风向, 如(11)和(12)式所示。此外, 算法迭代次数过多时, 可能是算法迭代的步长变得非常小, 容易陷入低效的迭代运算中。本研究设置算法运算的最大迭代次数为 $k_{\max} = 500$, 当算法迭代次数超过设定阈值时, 重新初始化参数 θ_1 和 θ_2 并重置迭代次数 k , 避免算法陷入死循环。

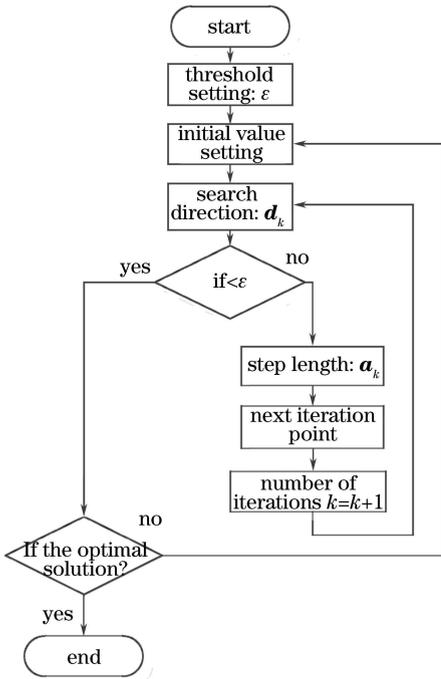


图 2 基于共轭梯度算法的 VAD 风场反演方法流程图
Fig. 2 Flow chart of the wind retrieval method of VAD based on conjugate gradient algorithm

4 印证实验及系统介绍

4.1 对比实验设计

为了印证激光雷达的测量能力, 同时为了检验基于共轭梯度算法的 VAD 风场反演方法的可靠性和适用性, 本课题组于 2015 年开展了相干多普勒激光雷达与符合 IEC 61400-12-1 国际标准的风杯风速计同步对比实验。实验条件如下: 风塔(MAST)和激光雷达空间相对位置的侧视图和俯视图如图 3 所示, A100L2 型风速测量仪和 W200P 型风标分别位于风塔 80 m 和 78 m 的位置, 风塔的基底和激光雷达高度相差约 50 m, 水平距离为 267 m; 激光雷达以仰角

20.8° 扫描风塔左右两侧的固定 7 个径向, 方位角覆盖范围为 60°; 单个径向测量时间约 2 s, 完成一次测量 7 个径向的时间约 14 s, 实验共持续 43 天。

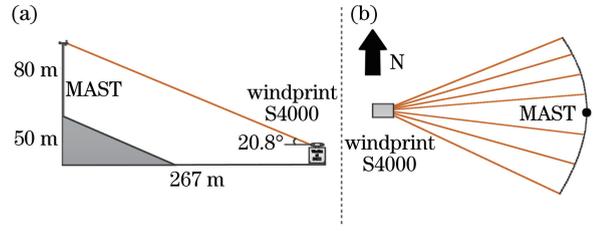


图 3 激光雷达与风杯风速计相对位置示意图。
(a) 侧视图; (b) 俯视图

Fig. 3 Schematic of the relative position of lidar and anemometer. (a) Lateral view; (b) top view

4.2 测量设备

本研究使用的相干多普勒激光雷达数据为青岛华航环境科技有限公司生产的 Wind Print S4000 扫描型脉冲相干激光雷达, 系统外观如图 4 所示, 系统相关参数指标如表 1 所示。



图 4 WindPrint S4000 型相干多普勒激光雷达系统外观
Fig. 4 External view of WindPrint S4000 coherent Doppler lidar

表 1 WindPrint S4000 型相干多普勒激光雷达系统参数指标

Table 1 System parameters of WindPrint S4000 coherent Doppler lidar

Qualification	Specification
Wavelength / nm	1550
Repetition rate / kHz	10
Pulse energy / μ J	150
Pulse width / ns	100-400
Speed measurement range / ms^{-1}	± 50
Speed measurement uncertainty / ms^{-1}	≤ 0.1
Scanner pointing accuracy / ($^\circ$)	0.1
Scan speed / [$^\circ \cdot \text{s}^{-1}$]	1-55
Spatial resolution / m	30
Measurement range / m	80-4000
	(6000 m maximum)
Range resolution / m	15-60
Measurement time of one light of sight (LOS) velocity profile / s	0.25
Power dissipation / W	< 300
Weight / kg	~ 75

4.3 IEC 61400-12-1 国际标准风杯风速计

对比实验使用英国 Vector 公司生产的符合 IEC 61400-12-1 国际标准的一级高精度风杯风速计, 分别为 A100L2 型风速测量仪[图 5(a)]和 W200P 型风向标[图 5(b)]。A100L2 型风速测量仪采用三杯式风杯设计, 风速测量范围为 $0.2 \sim 75 \text{ ms}^{-1}$, 测量精度分别为 0.1 ms^{-1} ($< 10.3 \text{ ms}^{-1}$)、 1% ($10.3 \sim 56.6 \text{ ms}^{-1}$)、 2% ($> 56.6 \text{ ms}^{-1}$)。W200P 型风向标正常工作时的启动风速为 0.6 ms^{-1} , 最大风速为 75 ms^{-1} , 测量范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 精度为 $\pm 2^\circ$, 分辨率为 $\pm 0.2^\circ$ 。更详细的参数指标可参考文献[22]。

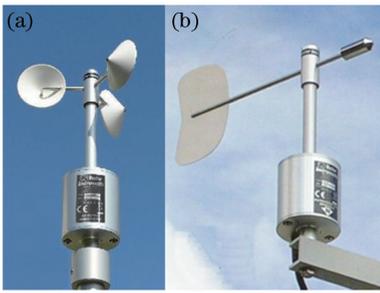


图 5 (a) A100L2 型风速测量仪; (b) W200P 型风向标
Fig. 5 (a) A100L2 wind speed measuring instrument;
(b) W200P wind vane

5 结果分析与讨论

使用基于共轭梯度算法的 VAD 风场反演方法处理测量的每组径向速度, 如图 6 所示。激光雷达测量的固定 7 个方向的径向速度以方框表示, 左右两点的方位角差为 60° , 算法结果用曲线表示。个例结果显示该方法能够较好地反演激光雷达扫描 60° 范围内的 7 个径向的测量数据。

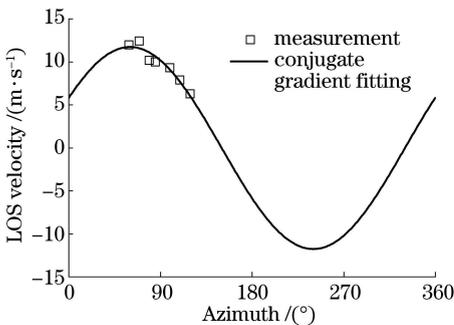


图 6 激光雷达实际测量数据(方框)和算法结果(曲线)
Fig. 6 Measurement data (squares) and algorithm result (curve) of Doppler lidar

为了减小质量较差的数据给对比结果带来的影响, 需要进行数据质量控制。本研究设置了信噪比、

扫描区间有效数据个数、数据有效率三个质量控制的判据。首先是信噪比质量控制(也是数据预处理过程), 本研究设置信噪比的上下限分别去除受到障碍物干扰和信号衰减异常影响的径向速度。其次是扫描区间有效数据个数质量控制, 经过信噪比质量控制后, 剩余径向速度个数不足 5 个时, 剔除该组测量数据。最后是数据有效率质量控制, 将反演的结果每 10 min 分成一组, 如果经过扫描区间有效数据个数质量控制后的数据个数占原有数据 80% 以下时, 全部剔除整组 10 min 内的测量结果。经过质量控制, 激光雷达测量的风速、风向 10 min 平均结果共 1982 组, 与风杯风速计的测量结果时间匹配。如图 7(a)、(b) 所示, 横坐标表示测量时间, 纵坐标表示风速和风向, 白色和黑色方框分别表示多普勒激光雷达和风杯风速计测量结果, 两种测量方式的结果在整体上看一致性较好。

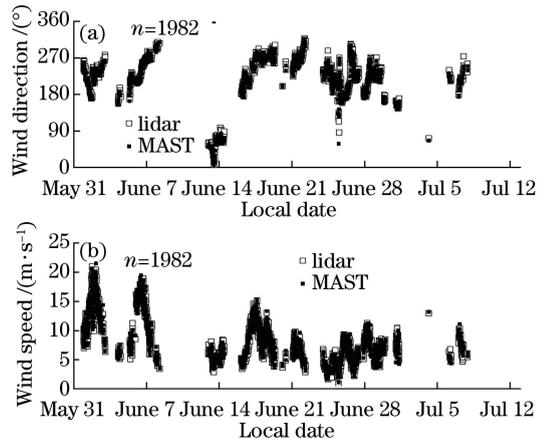


图 7 激光雷达与风杯风速计对比。(a) 风向; (b) 风速
Fig. 7 Comparison of Doppler lidar and anemometer.
(a) Wind direction; (b) wind speed

进一步统计对比激光雷达和同步测量的风杯风速计的 10 min 平均测量结果。风向、风速散点图统计对比结果如图 8(a)、(b) 所示, 横纵坐标分别表示风杯风速计和多普勒激光雷达测量值, 结果显示两种测量方式具有较好的一致性。统计结果显示: 风速、风向相关系数(R)分别为 0.991 和 0.998, 标准偏差(SD)分别为 0.52 m/s 和 5.2° , 偏差(BIAS)分别为 -0.02 m/s 和 3.6° 。风向的标准偏差和偏差较大的原因是由于多普勒激光雷达在定北时存在固定的角度偏差。需要说明的是, 为了避免风向过零对统计结果的影响(例如风向分别为 1° 和 359° 时实际相差 2°), 风向统计时去除了 0° 附近的数据, 故风向统计个数(1816)小于风速统计个数(1982)。

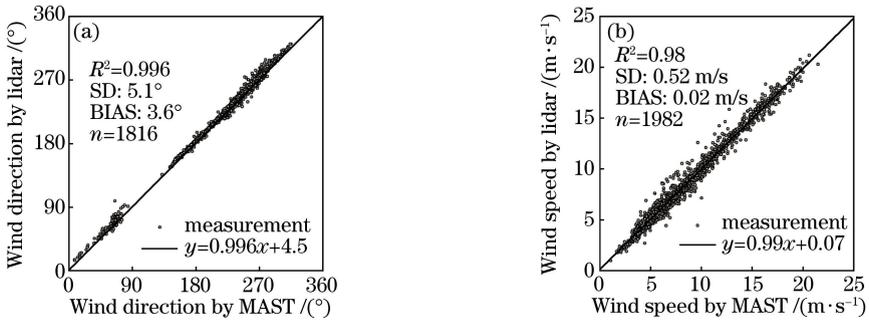


图 8 激光雷达和风杯风速计测量的 10 min 散点图对比。(a) 风向;(b) 风速

Fig. 8 Comparison of scatter plot of 10 min data measured by Doppler lidar and anemometer.

(a) Wind direction; (b) wind speed

由于 7 种共轭梯度算法迭代收敛阈值设置都为 $\epsilon = 10^{-5}$, 7 种算法的个例和统计结果表现都一致。几种共轭梯度算法的表现对比如表 2 所示。分别统计各个算法的总迭代次数, 输入质量控制后的秒级数据共 61837 组, 可以进一步得到每组数据的平均迭代次数。不难发现, 不同算法的运行效率差别较大; PRP 算法收敛速度最快, 平均每次迭代约 20 次, MHS 算法表现其次, 平均迭代次数约 23 次; 其他算法迭代次数较大, 运行时间偏长一些。FR、DY 和 CD 这三种算法在本次测试中表现一般, 三种算法有相同的分子项 $\|g_k\|^2$, 在适当的条件下可以保证算法的全局收敛性^[20-21], 但是数值表现不如 PRP 算法^[23], 其原因在于算法一旦在某次迭代过程中产生了小步长, 那么后面将产生连续小步长^[24]。

表 2 基于 7 种共轭梯度算法的 VAD 风场反演方法运行效率比较

Table 2 Comparison of running efficiency of the seven conjugate gradient algorithms for wind retrieval method of VAD

Algorithm	Total number of iteration	Average number of iteration	Performance period /s
HS	92152749	1490	5084.1
PRP	1239360	20	78.6
FR	6862718	111	358.5
CD	40291304	652	2044.9
LS	91340670	1477	4885.9
DY	42460017	687	2346.8
MHS	1429348	23	91.25

6 结 论

针对当前大气风场测量中相干多普勒激光雷达的 VAD 风场反演方法存在因要求较大的方位角扫描范围而影响了方法适用性和精度的问题, 提出并使用机器学习中最优化理论的共轭梯度算法代替

VAD 方法中复杂的傅里叶级数展开求解的方式, 在建立最优化反演模型的基础上, 将修正后的共轭梯度算法应用于风场反演方法中, 保证在较小的方位角扫描范围的情况下反演结果的准确性。

针对算法收敛性的问题, 分析了共轭梯度算法直接应用于风场反演存在的技术局限, 例如对初始值依赖较大、反演结果可能收敛于鞍点、不收敛于最优解等不足, 提出使用 Hessian 矩阵修正算法, 应用 Hessian 矩阵的正定性, 有效剔除鞍点的影响, 实现反演结果的精准收敛。本研究选用最小二乘法作为目标函数, 利用修正后的共轭梯度算法对目标函数进行优化。对于其他目标函数的优化, 如最大似然估计函数, 本方法同样适用。

与符合 IEC 61400-12-1 国际标准的风杯风速计长时间对比实验显示, 在激光雷达扫描范围降低到 60° 和采样径向个数为 7 个的情况下, 10 min 平均的风速、风向对比结果显示两者相关系数达到 0.99, 风速标准偏差和偏差分别为 0.52 m/s 和 -0.02 m/s, 风向标准偏差和偏差分别为 5.1° 和 3.6°。考虑到激光雷达在定北时存在固定的角度偏差, 结果有效印证了本方法的准确性和适用性, 对于动态复杂风场监测和湍流的研究具有重要意义。

研究中还对 7 种共轭梯度算法进行了比较, 结果表明在探测精度相当的情况下, PRP 算法具有最快的收敛速度, MHS 算法仅次于 PRP 算法, FR、DY 和 CD 算法运算过程中产生连续小步长, 收敛速度较慢。因此, 建议使用 PRP 共轭梯度算法。此外, 本研究所做的对比实验设计与实测结果分析, 是对相干多普勒激光雷达测量性能的有力印证, 将为其在高精度风速测量中的推广应用提供参考依据。未来将进一步研究把其他迭代速度更快的最优化算法应用于单部多普勒激光雷达的风场反演中, 同时

将开展多部激光雷达联合遥感探测大气风场方法的研究,提高风场探测精度。

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。感谢王琪超、张洪玮、戚一麟在数据测量方面提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] Yang H Z, Zhao C M, Zhang H Y, *et al.* Design and optimization of all-fiber lidar transmitting and receiving optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106005.
杨宏志, 赵长明, 张海洋, 等. 全光纤激光雷达发射和接收光学系统设计与优化 [J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106005.
- [2] Zhang N N, Han Y L, Chen T D, *et al.* Design of direct detection Doppler lidar with coherent light path [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (10): 1010005.
张楠楠, 韩於利, 陈廷娣, 等. 相干光路的直接探测多普勒激光雷达设计 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1010005.
- [3] Browning K, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1968, 7 (1): 105-113.
- [4] Srivastava R, Matejka T, Lorello T. Doppler radar study of the trailing anvil region associated with a squall line [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(4): 356-377.
- [5] 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.
- [6] 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>.
- [7] Shao A M, Qiao X S, Qiu C J, *et al.* Criteria of quality control for VAD winds [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2009, 45 (5): 57-62.
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(自然科学版)*, 2009, 45(5): 57-62.
- [8] Weissmann M, Braun F J, Gantner L, *et al.* The Alpine Mountain plain circulation: airborne Doppler lidar measurements and numerical simulations [J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133 (11): 3095-3109.
- [9] Diao W F, Liu J Q, Zhu X P, *et al.* Study of all-fiber coherent Doppler lidar wind profile nonlinear least square retrieval method and validation experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (9): 0914003.
刁伟峰, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0914003.
- [10] Li Z G, Sun Z Z, Zhao Z L, *et al.* Wind retrieval of airborne fiber Doppler wind lidar and experimental verification [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37 (5): 765-771.
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 [J]. *应用光学*, 2016, 37(5): 765-771.
- [11] Huang M, Wang Y L, Wang N, *et al.* Algorithm and simulation of downward velocity azimuth display of airborne wind lidars [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 22-25.
黄敏, 王玉兰, 王娜, 等. 机载测风激光雷达下视 VAD 反演及算法仿真 [J]. *激光技术*, 2012, 36(1): 22-25.
- [12] Emmitt G D. Airborne Doppler lidar surface returns: data products other than tropospheric winds [C]. SPIE, 2003, 4893: 319-326.
- [13] Pan J Y, Wu S Y, Liu G, *et al.* Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720-1724.
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.
- [14] Wang G N, Liu B Y, Feng C Z, *et al.* Data Quality Control Method for VAD Retrieval based on Coherent Wind Lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (accepted).
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*, (accepted).
- [15] Hestenes M R, Stiefel E. Methods of conjugate gradients for solving linear systems [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1952, 49(6): 409-436.
- [16] Polyak B T. The conjugate gradient method in extremal problems [J]. *USSR Computational Mathematics & Mathematical Physics*, 1969, 9(4): 94-112.
- [17] Fletcher R, Reeves C M. Function minimization by conjugate gradients [J]. *Computer Journal*, 1964, 7 (2): 149-154.

- [18] Rothlauf F. Practical methods of optimization [M]. John Wiley, 1980: 71-94.
- [19] Liu Y, Storey C. Efficient generalized conjugate gradient algorithms, part 1: theory [J]. Journal of Optimization Theory & Applications, 1991, 69(1): 139-152.
- [20] Dai Y H, Yuan Y. Anonlinear conjugate gradient method with a strong global convergence property [J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999, 10(1): 177-182.
- [21] Yao S W. Research on a class of conjugate gradient methods [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- 姚胜伟. 几类共轭梯度算法的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [22] Vector Instruments. Anemometers [EB/OL]. [2017-09-01]. <http://www.windspeed.co.uk/ws/index.php?option=news&task=viewarticle&sid=5>.
- [23] Nocedal J, Wright S J. Numerical optimization [M]. Springer, 1999: 29-76.
- [24] Powell M J D. Restart procedures for the conjugate gradient method [J]. Mathematical Programming, 1977, 12(1): 241-254.