

## 基于激光雷达探测的三维风场变分反演算法

高航<sup>1,2</sup>, 周洁<sup>1,2</sup>, 胡健<sup>3</sup>, 汪洋<sup>4</sup>, 李健兵<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073;<sup>2</sup>国防科技大学电子信息系复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;<sup>3</sup>91236 部队气象中心, 辽宁 葫芦岛 125000;<sup>4</sup>民航湖南空管分局气象台, 湖南 长沙 410073

**摘要** 基于单部雷达的三维风场精细反演是航空气象学、精准风力资源评估等领域的重要研究问题。为高效、准确地获得小尺度风场的精细三维结构, 提出一种基于单部激光雷达探测的三维风场局地/全局变分反演算法。本算法首先在小范围内构建局地变分法用于反演三维风场初值, 然后在激光雷达扫描区域内基于全局变分法对初值进行调整。在仿真中对比了本文方法迭代 10 次和两步变分法收敛后的结果, 发现本文方法性能优于两步变分法, 在较均匀风场情况下本文算法反演三维风速的均方根误差平均降低 1.49 m/s, 在不均匀风场情况下平均降低 1.19 m/s。仿真结果和外场实验数据分析表明, 在激光雷达扫描区域覆盖较大仰角范围的情况下, 本文算法可较为快速准确地获得三维风场反演结果, 在航空安全、风资源评估等领域具有较好的应用潜力。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 三维风场; 探测; 反演; 变分法

中图分类号 TN958

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2028002

## Variational Retrieval Algorithm for Three-Dimensional Wind Field Based on Lidar Detection

Gao Hang<sup>1,2</sup>, Zhou Jie<sup>1,2</sup>, Hu Jian<sup>3</sup>, Wang Yang<sup>4</sup>, Li Jianbing<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;<sup>3</sup>Meteorological Center, 91236 Troop, Huludao, Liaoning 125000, China;<sup>4</sup>Meteorological Observatory for Air Traffic Regulating Branch of Hunan, Civil Aviation Administration of China, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Retrieval of small-scale three-dimensional (3D) wind field based on a single radar is an important issue in various fields, including aviation meteorology and wind resource assessment. To obtain the 3D structure of small-scale wind field with high efficiency, this study proposes a variational retrieval method based on lidar detection. The proposed method comprises local and global variational methods. First, the local variational method is constructed locally in an analysis volume to preliminarily retrieve the 3D wind field, as the initial value. Second, the initial value is tuned using the global variational method in the entire lidar scanning volume. Simulation results show that the proposed method outperforms the traditional two-step variational method. The root mean square error of the algorithm reduces by 1.49 m/s and 1.19 m/s in the case of homogeneous and inhomogeneous wind fields, respectively. Simulation and field detection results both prove that the proposed algorithm can obtain accurate 3D wind field retrieval results with high efficiency when the lidar scanning volume covers a large range of the elevation angle. The proposed

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-04-29; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (61771479)

通信作者: \*jianbingli@nudt.edu.cn

method can be applied in aviation safety, wind resource assessment and other fields.

**Key words** remote sensing; lidar; three-dimensional wind field; detection; retrieval; variational method

**OCIS codes** 280.7250; 010.3640; 120.1880; 200.3050

## 1 引言

在航空安全<sup>[1]</sup>和风能领域<sup>[2]</sup>, 准确掌握低空风切变、湍流、飞机尾流和风力涡轮机尾流等精细的三维风场信息, 能够为飞机的安全起降和风力发电厂的架构优化提供技术支撑。目前, 机场<sup>[3-7]</sup>和风力发电厂<sup>[8-9]</sup>已将具有高分辨率和准确率的激光雷达广泛用于风场探测<sup>[10]</sup>。但是激光雷达只能获取风场的径向速度, 因此从径向速度中反演出三维风场信息已成为航空安全和风能领域的重要研究内容。

基于单部激光雷达的风场反演问题, 实质上就是通过扫描的一维径向速度数据求取三维风场的过程。为求解该反演问题, 需要附加条件假设或引入物理模型。基于此, 可以将目前的风场反演算法分为两类, 一类是基于条件假设的方法, 另一类是基于物理模型的数据同化算法。

第一类基于条件假设的方法包含 4 类对风场速度分布的假设, 分别是: 均匀、局部均匀、线性和局部线性。在风场均匀的假设下, 利用速度方位显示(VAD)<sup>[11]</sup>方法通过雷达平面显示器(PPI)扫描数据计算得到大尺度的廓线特征。在此基础上, 进一步假设水平散度和垂直速度在较小的高度内不变, 反演得到水平散度和垂直速度<sup>[12]</sup>。在风场局部均匀的假设下, 陶祖钰根据部分简谐曲线拟合提出了整圆三等分 VAD<sup>[13]</sup>和半圆 VAD<sup>[14]</sup>, 利用相邻方位角上水平径向速度的差异提出了速度-方位角处理(VAP)<sup>[15]</sup>方法。为提高风场反演精度, 研究人员提出了扩展 VAP<sup>[16]</sup>、非对称 VAP<sup>[17]</sup>、积分 VAP<sup>[18]</sup>、二维滤波 VAP<sup>[19]</sup>、共轭梯度 VAD<sup>[20]</sup>等方法。经验证发现, 将 VAP 方法中的方位角范围扩大至整个 PPI 扫描范围时, VAP 方法等价于 VAD 方法<sup>[21]</sup>。在线性风场假设下, Browning 等<sup>[22]</sup>将雷达探测到的速度按傅里叶级数展开, 提升了风场反演的可靠性。在风场局部线性的假设下, 利用速度体积处理(VVP)方法<sup>[23]</sup>建立扇形分析体积单元, 并利用最小二乘法求解三维风参数(包含风切变和平均风速)。受限于数值解的不稳定以及复杂的求解过程, VVP 方法未得到广泛的应用<sup>[24-25]</sup>。为克服 VVP 求解中的病态矩阵问题, 魏鸣等<sup>[26]</sup>提出共轭梯度算法迭代求解的思想, Li 等<sup>[27]</sup>通过近似假设和分步计算提出

了分步速度体积处理(SVVP)方法, Li 等<sup>[28-29]</sup>利用支持向量机(SVM)向求解过程添加正则化约束, Boccipio<sup>[30]</sup>利用奇异值分解(SVD)方法分解, 避免了待求变量之间的线性相关。为简化求解过程, 速度平面处理(VPP)方法<sup>[31]</sup>被提出, 余艳梅等<sup>[32]</sup>和蒋立辉等<sup>[33]</sup>通过假定分析体积单元内的风速分布均匀, 将三维风参数数目从 6 个(三维平均风速和三维风切变)减少至 3 个(三维平均风速)。这一类基于条件假设的方法均可以以较小的计算代价从雷达径向速度反演出风速, 但仅适用于风场是近似平滑、线性或保持准静止的情况, 因而在实际应用中局限性很大, 特别是对于不满足线性风场假定的强对流天气, 其将可能出现错误的、与实际风场相悖的反演结果<sup>[34-37]</sup>。

第二类基于物理模型的数据同化算法, 可以分为连续数据同化和顺序数据同化两种。两种同化算法都由理论动力模式和观测数据驱动<sup>[38]</sup>。连续数据同化主要包含三维变分法和四维变分法, 将代价函数设定为受背景场、边界条件和理论动力模式共同约束的惩罚函数<sup>[39]</sup>, 通过寻求代价函数的极小值反演得到风场。三维变分法通常结合经验或误差协方差确定各惩罚项的权重, 再通过代价函数的极值反演风场。但是这种方法没有考虑风场随时间的演变, 反演得到的风场是一段时间内风场的平均信息<sup>[39-43]</sup>。四维变分法可以看作是三维变分法在时间上的延拓, 综合考虑了同化时间窗口内多个观测值和理论动力模式随时间的非线性演变<sup>[44-45]</sup>。顺序数据同化方法主要包含集合卡尔曼滤波<sup>[46-48]</sup>、粒子滤波等, 包括预测和更新两个部分, 无观测时通过蒙特卡罗方法(Monte Carlo method)模拟动力模式前向积分过程来预测状态变量, 直到实行观测时进行更新。顺序数据同化方法的优点是用粒子分布的统计信息代表误差统计量和分析值, 解决了计算量大的问题, 但是集成员个数的限制容易导致滤波发散的问题<sup>[49-50]</sup>。

目前已经得到广泛应用的是连续数据同化和基于条件假设的方法, 其中四维变分法由于需要巨大的计算量, 不适用于实时性要求较高的风场探测和反演。为高效、准确地获得小尺度风场的精细三维结构, 本文在 VPP 方法的基础上, 首先在分析体积单元内利用局地变分法来反演三维风场作为迭代初

值,再在激光雷达扫描区域内通过全局变分法对迭代初值进行调整,同时选用质量连续性方程和平滑项作为全局变分迭代过程中的惩罚项,可以获得更准确的风场反演结果。在仿真中综合考虑观测误差和模式误差的影响,确定了与风场均匀性相适应的分析体积单元尺寸,并进一步确定了迭代次数的取值。为了在实验中验证所提方法用于反演水平和垂直风场时的性能,分别设置了探空气球和激光雷达垂直向上扫描的对比实验,发现反演的水平和垂直速度均与真实探测速度接近,且连续性和平滑性约束可以提供更多的垂直速度信息。

在计算量方面,本研究具有较小的计算量,局地变分法可以按序处理激光雷达扫描区域中的每个探测单元,避免了矩阵的求逆运算,所需计算量小;在全局变分法中将局地变分法反演的三维风速作为迭代初值,可加快全局变分法的收敛速度,在仿真实验中已验证,全局变分法只要在 10~20 次迭代内收敛就可以得到较准确的反演结果。

## 2 风场反演算法

### 2.1 局地变分法

在晴空条件下,激光雷达通过大气气溶胶粒子的后向散射信号的多普勒频移可以获得扫描空间中风场的径向速度。激光雷达扫描风场的示意图如图 1 所示,激光雷达以多个仰角进行 PPI 扫描,该扫描方式可以获得更大的扫描波束覆盖范围,可为精细的风场反演算法提供足够的数据支撑。以激光雷达为中心建立笛卡儿坐标系  $(x, y, z)$  和球坐标系  $(\varphi, \theta, r)$ ,其中  $\varphi$  表示仰角,  $\theta$  表示方位角,  $r$  表示观测点到激光雷达的径向距离。

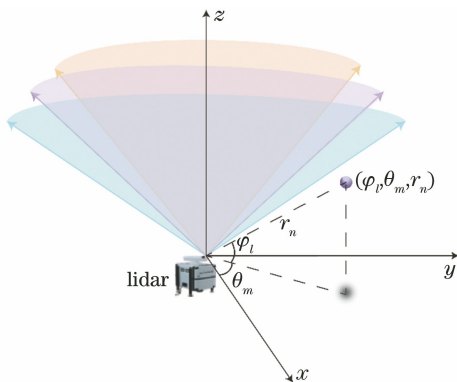


图 1 激光雷达扫描策略示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lidar scanning strategy

在激光雷达扫描空间中,以第  $N_{lmm}$  个探测单元为中心选择仰角跨度为  $[\varphi_l - I/(2\delta_\varphi), \varphi_l + I/(2\delta_\varphi)]$ ,方

位角跨度为  $[\theta_m - J/(2\delta_\theta), \theta_m + J/(2\delta_\theta)]$ ,径向距离跨度为  $[r_n - K/(2\delta_r), r_n + K/(2\delta_r)]$  的连续区域作为分析体积单元,如图 2 所示,其中  $(\varphi_l, \theta_m, r_n)$  是第  $N_{lmm}$  个探测单元的球坐标,  $\delta_\varphi, \delta_\theta$  和  $\delta_r$  分别为激光雷达的仰角、方位角和径向分辨率,  $I$  为分析体积单元包含的仰角个数范围,  $J$  为分析体积单元包含的方位角个数范围,  $K$  为分析体积单元包含的径向距离门个数范围。分析体积单元内包含  $[(I + 1) \times (J + 1) \times (K + 1)]$  个激光雷达探测单元。

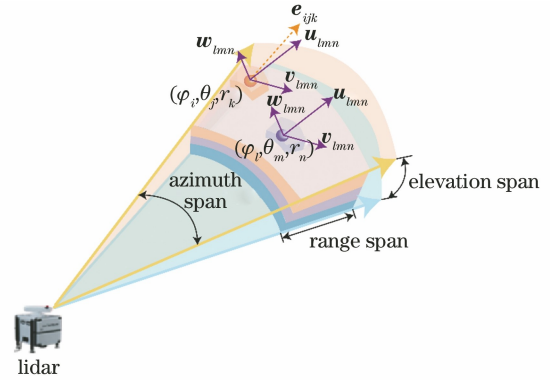


图 2 以第  $N_{lmm}$  个探测单元为中心的分析体积单元

Fig. 2 Analysis volume centered on the  $N_{lmm}^{\text{th}}$  measurement cell

设位于分析体积中心的探测单元速度为  $[\mathbf{u}_{lmm}, \mathbf{v}_{lmm}, \mathbf{w}_{lmm}]$ ,其中  $\mathbf{u}_{lmm}$  表示径向速度,  $\mathbf{v}_{lmm}$  表示水平切向速度,  $\mathbf{w}_{lmm}$  表示  $\mathbf{u}_{lmm}, \mathbf{v}_{lmm}$  所在平面法向的垂直速度。三个速度向量在以激光雷达为中心的笛卡儿坐标系中可以写为

$$\mathbf{u}_{lmm} = u_{lmm} (\cos \varphi_l \cos \theta_m \mathbf{i} + \cos \varphi_l \sin \theta_m \mathbf{j} + \sin \varphi_l \mathbf{k}), \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_{lmm} = v_{lmm} (-\sin \theta_m \mathbf{i} + \cos \theta_m \mathbf{j}), \quad (2)$$

$$\mathbf{w}_{lmm} = w_{lmm} (-\sin \varphi_l \cos \theta_m \mathbf{i} - \sin \varphi_l \sin \theta_m \mathbf{j} + \cos \varphi_l \mathbf{k}), \quad (3)$$

其中  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  为沿  $x, y, z$  三个坐标轴正向的单位矢量。以  $N_{lmm}$  探测单元为中心的分析体积单元内坐标为  $(\varphi_i, \theta_j, r_k)$  的第  $N_{ijk}$  个探测单元,其径向单位矢量可以写为

$$\mathbf{e}_{ijk} = \cos \varphi_i \cos \theta_j \mathbf{i} + \cos \varphi_i \sin \theta_j \mathbf{j} + \sin \varphi_i \mathbf{k}. \quad (4)$$

假设分析体积内所有探测单元的速度相等,则中心单元的速度  $(\mathbf{u}_{lmm}, \mathbf{v}_{lmm}, \mathbf{w}_{lmm})$  在每个探测单元的径向投影应与雷达探测的径向速度相等,因此可以在每个分析体积内局地地建立如下目标函数:

$$J_{\text{local}} = \frac{1}{2} \sum_{\varphi_i = \varphi_l - I/(2\delta_\varphi)}^{\varphi_l + I/(2\delta_\varphi)} \sum_{\theta_j = \theta_m - J/(2\delta_\theta)}^{\theta_m + J/(2\delta_\theta)} \sum_{r_k = r_n - K/(2\delta_r)}^{r_n + K/(2\delta_r)} \times (F_{ijk} - U_{ijk}^{\text{(obs)}})^2 = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k \in A_{lmm}} (F_{ijk} - U_{ijk}^{\text{(obs)}})^2, \quad (5)$$



式中  $U_{ijk}^{(obs)}$  为激光雷达在分析体积中第  $N_{ijk}$  个探测单元处观测的径向速度值,  $A_{lmn}$  表示以雷达扫描空间中以第  $N_{lmn}$  个探测单元为中心建立的分析体积单元,  $F_{ijk}$  为分析体积单元中心的速度在  $\mathbf{e}_{ijk}$  上的投影, 可表示为

$$F_{ijk} = \langle \mathbf{u}_{lmn}, \mathbf{e}_{ijk} \rangle + \langle \mathbf{v}_{lmn}, \mathbf{e}_{ijk} \rangle + \langle \mathbf{w}_{lmn}, \mathbf{e}_{ijk} \rangle = u_{lmn} (\cos \varphi_l \cos \varphi_i \cos \Delta\theta_j + \sin \varphi_l \sin \varphi_i) - v_{lmn} \cos \varphi_i \sin \Delta\theta_j + w_{lmn} (\cos \varphi_l \sin \varphi_i - \sin \varphi_l \cos \varphi_i \cos \Delta\theta_j), \quad (6)$$

其中,  $\Delta\theta_j = \theta_m - \theta_j$  表示分析体积中第  $N_{ijk}$  个探测

单元到分析体积中心的方位角之差。

通过求解  $\frac{\partial J_{local}}{\partial \mathbf{v}_{lmn}} = 0$  和  $\frac{\partial J_{local}}{\partial \mathbf{w}_{lmn}} = 0$ , 可以得到使

$J_{local}$  取极小值时速度  $\mathbf{v}_{lmn}$  和  $\mathbf{w}_{lmn}$  的大小。由于分析体积单元内的方位角以  $\theta_m$  为中心, 因此不同方位角上  $\sum_{\theta_j = \theta_m - J/(2\delta\theta)}^{\theta_m + J/(2\delta\theta)} C \cdot \sin \Delta\theta_j = 0$  正负抵消, 其中  $C$  为任意常数。令  $u_c$  为中心单元处雷达探测的径向速度值,  $u, v, w$  的表达式可以简化为

$$\begin{cases} u_{lmn} = U_{lmn}^{(obs)} \\ v_{lmn} = -\frac{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} U_{ijk}^{(obs)} \cdot \cos \varphi_i \sin \Delta\theta_j}{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} (\cos \varphi_i \sin \Delta\theta_j)^2} \\ w_{lmn} = \frac{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} [U_{ijk}^{(obs)} - u_c \cdot (\cos \varphi_l \cos \varphi_i \cos \Delta\theta_j + \sin \varphi_l \sin \varphi_i)] \partial F_{ijk} / \partial w}{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} (\cos \varphi_l \sin \varphi_i - \sin \varphi_l \cos \varphi_i \cos \Delta\theta_j)^2} \end{cases}, \quad (7)$$

其中,  $\partial F_{ijk} / \partial w = \cos \varphi_l \sin \varphi_i - \sin \varphi_l \cos \varphi_i \cos \Delta\theta_j$ 。

对于激光雷达扫描空间中的每个探测单元, 以该探测单元为中心, 按照一定的径向、方位角和仰角跨度建立分析体积单元, 并通过 (7) 式计算该分析体积内的平均三维速度, 即该中心探测单元的三维速度。局地变分法可以有序地处理雷达扫描空间中的所有探测单元, 避免了矩阵的求逆运算, 所需计算量小, 速度快。

## 2.2 全局变分法

局地变分法是在分析体积单元内局地进行的, 获得的  $u, v, w$  可看作是分析体积单元内所有观测径向速度的线性加权。为提升算法对非线性风场的反演能力, 现利用符合物理规律的非线性惩罚项对雷达扫描区域内所有探测单元的水平切向速度  $\mathbf{v}$

和垂直速度  $\mathbf{w}$  的大小进行调整。

定义表征风场连续性和平滑性的代价函数为

$$J_{global}(\mathbf{v}, \mathbf{w}) = \sum_{l,m,n \in S_{Lidar}} [(\nabla \cdot \mathbf{V}_{lmn})^2 + (\nabla \times \mathbf{V}_{lmn})^2], \quad (8)$$

式中:  $l, m, n \in S_{Lidar}$  表示激光雷达扫描空间中的第  $N_{lmn}$  个探测单元, 坐标为  $(\varphi_l, \theta_m, r_n)$ ;  $S_{Lidar}$  为雷达扫描区域内所有探测单元的集合, 集合内元素个数为  $L \times M \times N$ ;  $\mathbf{V}_{lmn}$  为雷达扫描空间中的三维笛卡儿坐标风场;  $\nabla \cdot \mathbf{V}$  为风场的散度, 代表准均匀不可压缩流体的质量连续性方程;  $\nabla \times \mathbf{V}$  为其涡度, 代表风场的平滑性。

将坐标为  $(\varphi_l, \theta_m, r_n)$  的探测单元的反演速度  $(u_{lmn}, v_{lmn}, w_{lmn})$  变换到笛卡儿坐标中可得

$$\mathbf{V}_{lmn} = \begin{bmatrix} V_{lmn}^{(x)} \\ V_{lmn}^{(y)} \\ V_{lmn}^{(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_l \cos \theta_m & -\sin \theta_m & -\sin \varphi_l \cos \theta_m \\ \cos \varphi_l \sin \theta_m & \cos \theta_m & -\sin \varphi_l \sin \theta_m \\ \sin \varphi_l & 0 & \cos \varphi_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{lmn} \\ v_{lmn} \\ w_{lmn} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

其中  $V_{lmn}^{(x)}, V_{lmn}^{(y)}, V_{lmn}^{(z)}$  分别表示第  $N_{lmn}$  个探测单元处反演得到的沿  $x, y, z$  轴的速度。

设定局部变分法中得到的速度  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{w}$  为迭代初值, 通过拟牛顿法少量迭代后, 完成在物理规律约

束下对局部变分法反演结果的调整。值得注意的是,  $u$  为激光雷达在每个探测单元处观测的径向速度值, 因此在 (8) 式中, 无须添加径向速度约束项, 也能有效减少迭代过程的计算量。

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真设置

仿真激光雷达在每个仰角上作完整的 PPI 扫描,设置扫描仰角范围为  $\varphi_0 + n \cdot \delta_\varphi$ ,其中  $\varphi_0 = 1^\circ$ ,  $\delta_\varphi = 5^\circ$ ,  $n = 1, 2, \dots, 12$ ; 在每个仰角上,雷达扫描的方位角范围为  $\theta_0 + m \cdot \delta_\theta$ ,其中  $\theta_0 = 5^\circ$ ,  $\delta_\theta = 12^\circ$ ,  $m = 1, 2, \dots, 30$ ; 探测单元到激光雷达的径向距离为  $r_0 + k \cdot \delta_r$ ,其中  $r_0 = 50 \text{ m}$ ,  $\delta_r = 30 \text{ m}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 32$ 。扫描示意图如图 1 所示。

为了综合验证本文方法在不同风场情况下的性能,利用两种仿真风场进行对比。在第一种情况下,

仿真风场为

$$[\mathbf{V}^{(x)} \quad \mathbf{V}^{(y)} \quad \mathbf{V}^{(z)}]^\text{T} = [10 \quad 5 \quad 2]^\text{T} + \mathbf{V}_{\text{turb}}, \quad (10)$$

在第二种情况下,仿真风场为

$$[\mathbf{V}^{(x)} \quad \mathbf{V}^{(y)} \quad \mathbf{V}^{(z)}]^\text{T} = [10 \quad 5 \quad 2]^\text{T} + \mathbf{U}_{\text{turb}} + \mathbf{S} [\mathbf{X} \quad \mathbf{Y} \quad \mathbf{Z}]^\text{T}, \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{L \times M \times N}$  分别为探测单元在以激光雷达为原点的笛卡儿坐标系(如图 1 所示)中的  $x, y, z$  坐标;  $\mathbf{X}_{\text{turb}} = [\mathbf{X}_{\text{turb}}^{(x)} \quad \mathbf{X}_{\text{turb}}^{(y)} \quad \mathbf{X}_{\text{turb}}^{(z)}]^\text{T}$  代表分布于整个雷达扫描空间中耗散率为  $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$  的湍流速度;  $\mathbf{S}$  为风切变因子矩阵,其中  $S_i^{(j)}$  表示  $j$  ( $j=1$  表示  $x, j=2$  表示  $y, j=3$  表示  $z$ ) 方向的风沿  $i$  方向的切变,表达式为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_x^{(1)} & S_y^{(1)} & S_z^{(1)} \\ S_x^{(2)} & S_y^{(2)} & S_z^{(2)} \\ S_x^{(3)} & S_y^{(3)} & S_z^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.002 \text{ s}^{-1} & 0.002 \text{ s}^{-1} & -0.002 \text{ s}^{-1} \\ 0.002 \text{ s}^{-1} & -0.002 \text{ s}^{-1} & -0.002 \text{ s}^{-1} \\ -0.002 \text{ s}^{-1} & -0.002 \text{ s}^{-1} & 0.002 \text{ s}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

#### 3.2 参数调节及结果分析

在局地变分法中需要调节的参数包括分析体积单元的大小、径向跨度、方位角跨度和仰角跨度,在全局变分法中需要调节的参数为迭代次数。

##### 3.2.1 局地变分法参数调节

在局地变分法反演风场的过程中,其误差主要来源于探测单元径向速度的观测误差以及假设分析

体积单元内速度均匀造成的模式误差,因此可以通过对观测误差和模式误差的分析调节参数大小。

观测误差:假定在雷达扫描空间中,对径向速度的观测存在呈正态分布的随机观测误差  $\epsilon^{(o)} \sim \mathcal{N}(0, 0.5)$ ,  $\epsilon^{(o)} \in \mathbb{R}^{L \times M \times N}$ 。由于  $u, v, w$  与观测速度呈线性关系,因此受观测误差的影响,产生的误差分量分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{lmn}^u = \epsilon_{lmn}^{(o)} \\ \epsilon_{lmn}^v = -\frac{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} \epsilon_{ijk}^{(o)} \cdot \cos \varphi_i \sin \Delta \theta_j}{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} (\cos \varphi_i \sin \Delta \theta_j)^2} \\ \epsilon_{lmn}^w = \frac{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} [\epsilon_{ijk}^{(o)} - \epsilon_{lmn}^{(o)} \cdot (\cos \varphi_l \cos \varphi_i \cos \Delta \theta_j + \sin \varphi_l \sin \varphi_i)] \partial F_{ijk} / \partial w}{\sum_{i,j,k \in A_{lmn}} (\cos \varphi_l \sin \varphi_i - \sin \varphi_l \cos \varphi_i \cos \Delta \theta_j)^2} \end{array} \right., \quad (13)$$

由此导致的水平和垂直速度反演误差分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{lmn}^{(H)} = \sqrt{(\epsilon_{lmn}^{(u)} \cos \varphi_l - \epsilon_{lmn}^{(w)} \sin \varphi_l)^2 + (\epsilon_{lmn}^{(v)})^2} \\ \epsilon_{lmn}^{(V)} = \epsilon_{lmn}^{(u)} \sin \varphi_l + \epsilon_{lmn}^{(w)} \cos \varphi_l \end{array} \right. \quad (14)$$

图 3 中给出了在不同仰角  $\varphi_l$  和分析体积单元不同的方位角跨度  $\Delta \theta = J/2\delta \theta$  下,观测误差对水平风场[图 3(a) 和图 3(c)]和垂直风场[图 3(b) 和图 3(d)]速度反演结果的影响。图 3(a)和图 3(b)是通过 (13)式和(14)式计算得到的结果,图 3(c)

和图 3(d)是通过在(10)式的仿真风场中添加呈正态分布的随机观测误差  $\epsilon^{(o)} \sim \mathcal{N}(0, 0.5)$  后仿真得到的结果。可以发现仿真结果和理论结果具有较好的一致性:1)水平风场的误差集中在高仰角位置处,而垂直风场的误差集中在低仰角位置处。这一现象的另一种直观解释是在高仰角处径向速度中包含的水平速度信息较少,因此高仰角处水平风场的反演误差变大,而在低仰角处径向速度中包含的垂直速度信息较少,因此低仰角处垂直速度的反演误差变大;

2)水平风场和垂直风场反演的误差均随着方位角跨度  $\Delta\theta$  的增大而减小,这表明增大分析体积单元的

方位角跨度可以起到平滑滤波的作用,减少了观测误差的影响。

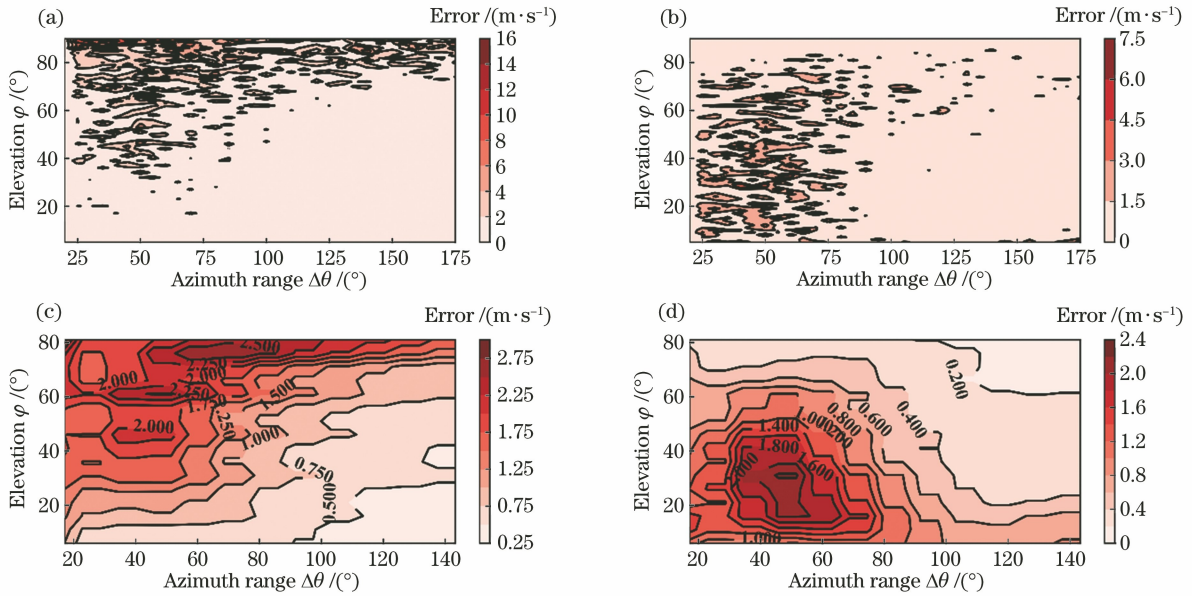


图 3 理论和仿真计算获取的观测误差对水平风场和垂直风场速度反演结果的影响。(a)理论计算的观测误差对水平风场反演结果的影响;(b)理论计算的观测误差对垂直风场反演结果的影响;(c)仿真计算的观测误差对水平风场反演结果的影响;(d)仿真计算的观测误差对垂直风场反演结果的影响

Fig. 3 Influence of the observation error from theoretical and simulation results on the wind speed retrieval. (a) Influence of the observation error from theoretical results on horizontal wind speed retrieval; (b) influence of the observation error from theoretical results on vertical wind speed retrieval; (c) influence of the observation error from simulation results on horizontal wind speed retrieval; (d) influence of the observation error from simulation results on vertical wind speed retrieval

模式误差:由于局地变分法的前提是分析体积单元内风场均匀的假设,因此其模式误差受分析体积单元大小的影响较大。模式误差主要受两方面影响:第一方面,当雷达扫描波束稀疏,或分析单元距离雷达较远(大于 5 km)时,局地变分法不可避免地存在较大模式误差;第二方面,通常大气在水平方向比较均匀,而在垂直方向呈明显的层状分布,因此分析体积单元在仰角上的跨度应小于其在方位角上的跨度;在风场不均匀的情况下,较大的方位角跨度会使得分析单元内风场均匀的假设造成较大的模式误差,而在风场较均匀的情况下,可选用较大的方位角跨度。

$$\mathbf{F} = \underset{[\mathbf{v}^{(x)}, \mathbf{v}^{(y)}, \mathbf{v}^{(z)}]_{i,j,k \in S}}{\operatorname{argmin}} \left\| \mathbf{U}_{ijk}^{(\text{obs})} - (\cos \varphi_i \cos \theta_j \mathbf{V}_{ijk}^{(x)} + \cos \varphi_i \sin \theta_j \mathbf{V}_{ijk}^{(y)} + \sin \varphi_i \mathbf{V}_{ijk}^{(z)}) \right\|_2. \quad (15)$$

下面给出风场均匀性度量方法。首先根据观测径向速度,通过最小二乘法拟合方程[(15)式],获得雷达扫描区域的均匀风场 $[\mathbf{V}^{(x)}, \mathbf{V}^{(y)}, \mathbf{V}^{(z)}]$ 。因选用的归一化距离不受风场大小的影响,在本研究中选用观测值和拟合值之间的归一化距离  $d$  来衡量观

测风场的均匀性,其定义表示为

$$d(\mathbf{U}^{(\text{obs})}, \mathbf{U}^{(\text{fit})}) = \frac{\sqrt{(\mathbf{U}^{(\text{obs})} - \mathbf{U}^{(\text{fit})})^T (\mathbf{U}^{(\text{obs})} - \mathbf{U}^{(\text{fit})})}}{\sqrt{(\mathbf{U}^{(\text{obs})})^T \mathbf{U}^{(\text{obs})}} + \sqrt{(\mathbf{U}^{(\text{fit})})^T \mathbf{U}^{(\text{fit})}}}, \quad (16)$$

其中  $\mathbf{U}^{(\text{obs})}, \mathbf{U}^{(\text{fit})} \in \mathbb{R}^{(L \times M \times N) \times 1}$  分别表示观测和拟合的径向速度,  $(\cdot)^T$  为矢量的转置。设定归一化距离  $d=0.05$  为风场均匀性判据的阈值,  $d \leq 0.05$  表示风场均匀,  $d > 0.05$  表示风场不均匀。

图 4 给出了 3.1 节中两种仿真情况下观测的径向速度和拟合径向速度的比较。图 4(a)为第一种仿真情况下[见(10)式]观测径向速度和拟合径向速度的比较,其归一化距离为 0.026,表示风场较均匀,偏差主要来源于湍流;图 4(b)为第二种仿真情况下[见(11)式]观测径向速度和拟合径向速度的比较,它们的归一化距离为 0.097,表示风场不均匀,偏差主要来源于湍流和风切变。

综合以上观测误差和模式误差的分析结果,可以发现径向距离跨度对  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{w}$  的计算无直接影响,因此固定其为  $K=4$ (覆盖径向范围 120 m),仰角上



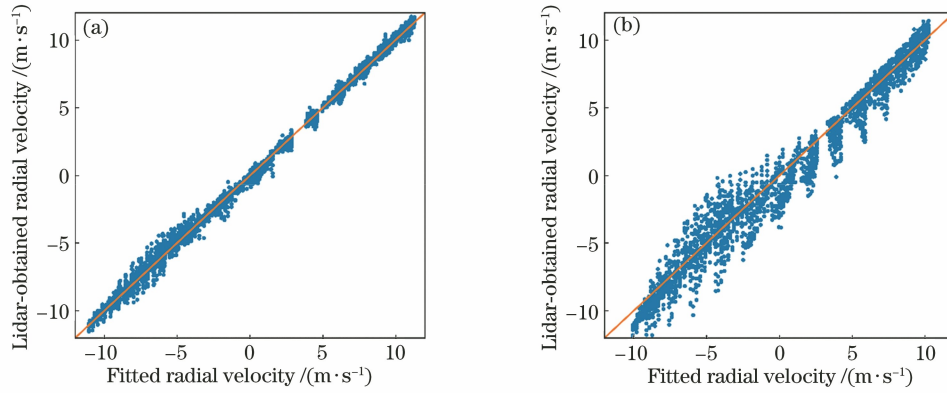


图 4 不同仿真风场情况下观测和拟合径向速度的比较。(a)均匀风场情况;(b)非均匀风场情况

Fig. 4 Comparison between the observed and fitted radial velocity in different simulated wind fields.

(a) Homogeneous wind field; (b) inhomogeneous wind field

的跨度不应太大,选取为  $I=2$ (覆盖仰角范围  $10^\circ$ )。在风场较均匀的情况下,大的方位角跨度可以压制观测误差,并起到平滑滤波的作用,因此设为  $J=24$  ( $\Delta\theta=144^\circ$ ,覆盖方位角范围  $288^\circ$ ),而在风场不均匀的情况下,较大的方位角跨度会使分析单元内风场均匀的前提假设引入较大的模式误差,因此设为  $J=4$  ( $\Delta\theta=24^\circ$ ,覆盖方位角范围  $48^\circ$ )。在仿真中不同方位角跨度的对比结果见表 1。其中,均方根误差(RMSE)用于定量表征三个风速分量的反演误差,定义为

$$x_{\text{RMSE}}(\mathbf{V}) = \sqrt{\frac{1}{N'} \sum_{l,m,n \in S_{\text{Lidar}}} (V_{lmn} - U_{lmn})^2}, \quad (17)$$

其中  $V_{lmn}$  和  $U_{lmn}$  分别为雷达扫描空间  $S_{\text{Lidar}}$  中第  $N'_{lmn}$  个探测单元处的反演风速和仿真风速值,  $N'$  为激光雷达扫描空间内所有探测单元的个数。

表 1 不同方位角跨度在不同仿真风场中的反演误差

Table 1 Retrieval errors of different azimuth spans in different simulated wind fields

Azimuth span	Homogeneous		Inhomogeneous	
	$\Delta\theta=24^\circ$	$\Delta\theta=144^\circ$	$\Delta\theta=24^\circ$	$\Delta\theta=144^\circ$
$x_{\text{RMSE}}(\mathbf{V}^{(x)}) / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.601	0.323	0.936	0.809
$x_{\text{RMSE}}(\mathbf{V}^{(y)}) / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.831	0.331	1.052	1.107
$x_{\text{RMSE}}(\mathbf{V}^{(z)}) / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.966	0.354	1.339	2.194

需要说明的是,在仿真中设置的仰角范围是  $[0^\circ, 60^\circ]$ ,根据图 3 可以看出垂直速度的误差主要在低仰角处,而水平速度的误差主要在高仰角处,因此相较于水平速度,表 1 中垂直速度的误差更大。

### 3.2.2 全局变分法参数调节

首先通过归一化距离将仿真的两种风场划分为

较均匀风场和不均匀风场,然后以每个探测单元为中心,根据 3.2.1 节中确定的方位角、仰角和径向距离跨度分别建立分析体积单元,分析体积单元之间相互重叠。根据局地变分法,计算以每个探测单元为中心的分析体积的平均三维速度,并将此三维速度作为该探测单元的速度,最后通过全局变分法对其进行调整。在全局变分法的调整过程中,需要调节的参数为迭代次数。

图 5 对比了在较均匀风场[图 5(a)]和非均匀风场[图 5(b)]情况下,本文算法反演的各个速度分量的反演误差随迭代次数的变化。

从图 5 中可以看出:

- 1) 较均匀风场情况下三个速度分量的反演误差总体小于不均匀风场的情况;
- 2) 较均匀风场情况下,随着迭代次数的增大,水平风速( $\mathbf{V}^{(x)}, \mathbf{V}^{(y)}$ )的 RMSE 误差变大,增大的数量级为  $10^{-2}$  m/s,而垂直风速的 RMSE 误差变小,减小的数量级为  $10^{-1}$  m/s,因此总体来说通过全局变分法调整可以提高较均匀风场情况下风速反演的准确率。

3) 非均匀风场情况下,随着迭代次数的增大,三个速度分量的反演误差均稳定减小,在 10 次到 20 次迭代中趋于收敛。

4) 综合图 5 可以看出,当迭代次数达到 10 次后,三个速度分量的 RMSE 随着迭代次数的增加,下降趋势减弱,因此本研究中取迭代次数为 10 次。

### 3.3 与传统三维变分法的结果比较

引入两步变分法<sup>[42-43]</sup>对本研究提出的新方法性能进行对比验证。结合文献[42-43, 51],建立三维变分法的代价函数为

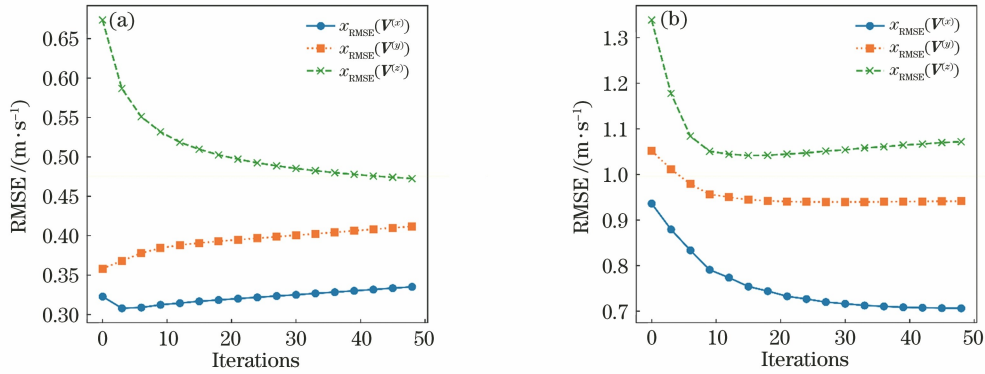


图 5 本文算法中采用不同迭代次数在不同仿真风场情况下对反演误差的影响。(a)在均匀风场情况下不同迭代次数对反演误差的影响;(b)在非均匀风场情况下不同迭代次数对反演误差的影响

Fig. 5 Influence of different iterations on the retrieval error in different simulated wind fields of the new method. (a) Influence of different iterations on the retrieval error in the case of homogeneous wind field; (b) influence of different iterations on the retrieval error in the case of inhomogeneous wind field

$$J_{\text{global}}(\mathbf{V}_{l_{mn}}) = \sum_{l_{mn} \in S_{\text{Lidar}}} [\omega_1 (F_{l_{mn}} - U_{l_{mn}}^{\text{obs}})^2 + \omega_2 (\mathbf{V}_{l_{mn}} - \mathbf{V}_{l_{mn}}^{(b)})^2 + \omega_3 (\nabla \cdot \mathbf{V}_{l_{mn}})^2 + \omega_4 (\nabla \times \mathbf{V}_{l_{mn}})^2], \quad (18)$$

式中: $U_{l_{mn}}^{\text{obs}}$  为激光雷达扫描空间中第  $N_{l_{mn}}$  个探测单元处观测的径向速度值; $F_{l_{mn}}, \mathbf{V}_{l_{mn}}$  的定分别见(6)式和(9)式; $\mathbf{V}_{l_{mn}}^{(b)}$  为第一步变分法获取的第  $N_{l_{mn}}$  个探测单元处的背景场;代价函数中后两项的定义见(8)式。代价函数中权重的取值参考文献[43],取  $\omega_1 = 1, \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 0.1$ 。在两步变分法中,第一步变分法利用勒让德多项式拟合,令代价函数中

$\omega_2 = 0$ ,通过拟牛顿法迭代获得三维风场的背景场  $\mathbf{V}_{l_{mn}}^{(b)}$ 。在第二步变分法中,设置风速的迭代初值为  $0 \text{ m/s}$ ,结合第一步变分法获得的背景场,得到风场反演结果。图 6 对比了在较均匀风场[图 6(a)]和非均匀风场[图 6(b)]情况下,第二步变分法得到的各个速度分量的反演误差随迭代次数的变化。

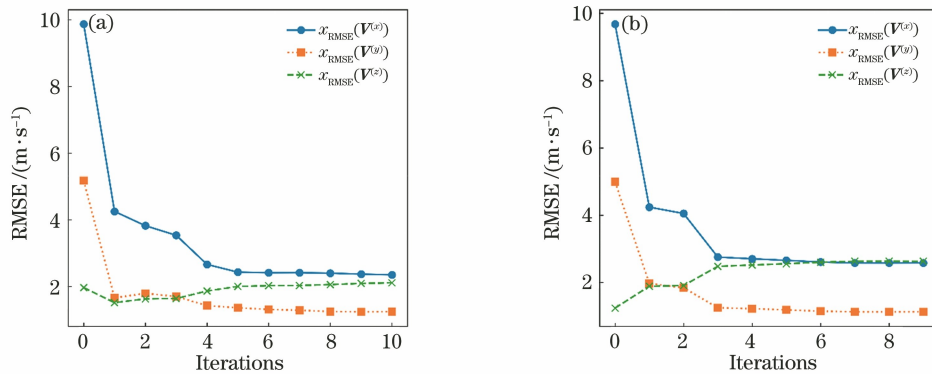


图 6 第二步变分法不同迭代次数在不同仿真风场情况下对反演误差的影响。(a)在均匀风场情况下不同迭代次数对反演误差的影响;(b)在非均匀风场情况下不同迭代次数对反演误差的影响

Fig. 6 Influence of different iterations on the retrieval error in different simulated wind fields of the second-step variation method. (a) Influence of different iterations on the retrieval error in the case of homogeneous wind field; (b) influence of different iterations on the retrieval error in the case of inhomogeneous wind field

从图 6 中可以发现,在第二步变分法求解过程中,随着迭代次数的增加,水平风速的误差逐渐变小,垂直风速的误差增大,这说明(18)式定义的代价函数不能有效约束垂直风速,还需寻找其他约束,以提升垂直速度的反演能力。结合 3.2.2 节中速度分

量反演误差随迭代次数的变化,表 2 给出本文方法迭代 10 次和两步变分法收敛后(第一步变分法迭代 150 次后收敛,第二步变分法迭代 10 次左右收敛)的结果对比,从表中可以发现,本文算法的性能优于两步变分法,本文算法反演得到的三维风速的均方



根误差在较均匀风场情况下分别降低 2.04, 0.86, 1.58 m/s, 平均降低 1.49 m/s, 在不均匀风场情况下分别降低 1.80, 0.18, 1.58 m/s, 平均降低

1.19 m/s。这一结果表明, 本文算法可以快速地得到准确的三维风场反演结果。

表 2 不同反演方法在不同仿真风场中的反演误差比较

Table 2 Retrieval-errors comparison of different methods in different simulated wind fields

RMSE / (m·s <sup>-1</sup> )	Homogeneous			Inhomogeneous		
	$V^{(x)}$	$V^{(y)}$	$V^{(z)}$	$V^{(x)}$	$V^{(y)}$	$V^{(z)}$
Two-step variation method	2.350	1.244	2.110	2.583	1.131	2.631
New method	0.313	0.386	0.526	0.788	0.955	1.049

### 4 实验数据验证

2020 年 9 月到 11 月, 利用 WindPrint S4000 激光雷达在长沙开展了风速探测实验。在本次外场实

验中, 激光雷达的系统参数和测量参数见表 3。激光雷达的扫描策略设置为: 在 7 个固定的仰角上进行 0°~200° 的 PPI 扫描, 激光雷达完成一次体积扫描需要约 3 min, 在该时间段内, 我们认为风场是平稳的。

表 3 外场实验中激光雷达的系统参数及测量参数

Table 3 System parameters and measurement parameters of WindPrint S4000 in the outfield experiment

Wavelength / nm	Pulse width / ns	Pulse accumulation	Azimuth / (°)	Azimuth resolution / (°)	Range / m	Range resolution / m	Elevation / (°)
1550	200	15000	0-200	18	90-1500	30	[1,3,8,15,25,40,60]

为了对本文方法反演的三维风速进行验证, 将由两种探测途径提供的不同高度上的三维风速作对比: 1) 在观测点附近放飞探空气球, 并通过追踪气球轨迹获得不同高度上的水平风速 ( $V^{(x)}$ ,  $V^{(y)}$ )<sup>[52]</sup>; 2) 激光雷达每次完成所有仰角上的 PPI 扫描后, 发射一束垂直向上的波束, 认为探测得到该波束的径向速度代表不同高度大气的垂直风速 ( $V^{(z)}$ )。

由于采用的两种探测途径都只能获得不同高度上的速度廓线, 即假设高度层上所有速度大小相等, 因此, 需要对扫描区间内获取的每个探测单元的三维速度进行线性插值, 得到统一高度上的三维速度廓线。

#### 4.1 水平速度的验证

通过与在同一时间段、同一场地进行风场探测的探空气球观测数据进行比较, 验证反演算法反演水平速度的性能。图 7 中给出了探空气球和本文方法(圆圈为仅使用局地变分得到的结果, 三角形为局地变分后利用全局变分进行调整后的结果)得到的  $x$ ,  $y$  方向上的水平风速。横坐标为探空气球获得的水平风速的大小, 纵坐标表示本文方法反演得到的风速大小, 其中反演得到的  $V^{(x)}$  与探空气球数据的比较结果见图 7(a),  $V^{(y)}$  与探空气球数据的比较结果见图 7(b)。

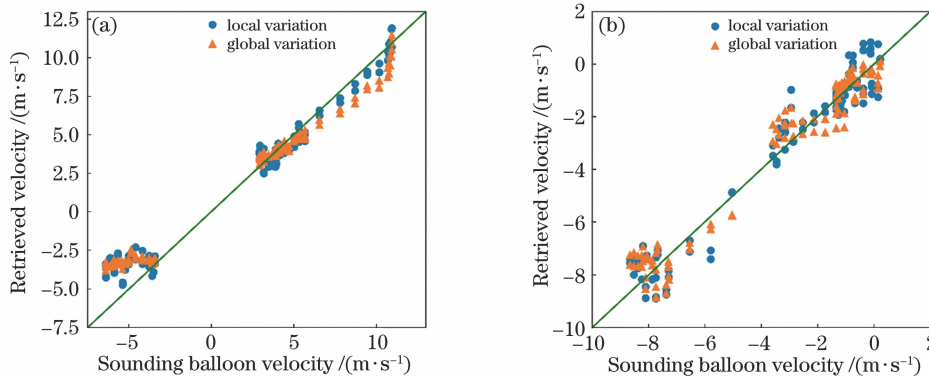


图 7 本文算法反演得到的水平速度与探空气球数据的比较结果。(a)  $V^{(x)}$  与探空气球数据的比较结果; (b)  $V^{(y)}$  与探空气球数据的比较结果

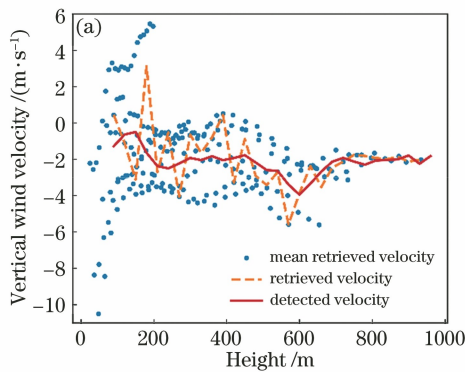
Fig. 7 Comparison between the retrieved horizontal wind speed ( $V^{(x)}$ ,  $V^{(y)}$ ) and the sounding balloon data. (a) Comparison results of  $V^{(x)}$  and sounding balloon data; (b) comparison results of  $V^{(y)}$  and sounding balloon data

为衡量本文方法反演得到的水平风速与探空气球风速数据的一致性,对比了局地变分反演结果和全局变分调整结果,表 4 给出了反演结果与探空气球数据的相关系数,从中可以发现对于水平速度的反演,仅采用局地变分法就可得到较理想(与探空气球获取风速的一致性高)的结果,进一步使用全局变分法迭代对反演结果的性能提升不大。为进一步验证算法反演水平风速的性能,还需积累更多的探空气球数据。

表 4 本文算法反演得到的水平速度与探空气球数据的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of the horizontal velocity between the retrieved results and the sounding balloon data

Correlation coefficient	$V^{(x)}/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$V^{(y)}/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )
Retrieval results of local variation	0.9866	0.9748
Retrieval results of global variation	0.9920	0.9775



#### 4.2 垂直速度的验证

通过与激光雷达探测得到的不同高度上垂直波束的垂直风速进行比较,验证算法反演垂直速度的性能。选取 2020 年 11 月 3 日 10 时 49 分到 10 时 52 分的一次激光雷达扫描数据,观测和拟合得到径向速度的归一化距离为  $d=0.166 > 0.05$ ,因此认为风场不均匀,需选用较小的方位角跨度。

图 8 给出了局地变分[图 8(a)]和全局变分法[图 8(b)]调整后获得的垂直速度与激光雷达探测得到的垂直速度的比较。其中每个圆点表示反演得到的垂直速度在不同高度上的平均值,虚线表示将圆点插值到激光雷达垂直扫描高度上的反演结果,实线表示激光雷达垂直探测得到的垂直速度。

从图 8 中可以发现,在仅进行局部变分的情况下,均方根误差为  $x_{RMSE}(V^{(z)})=1.44 m/s$ ,高度低的探测单元反演得到的垂直速度具有较大波动,不准确,进一步追踪速度偏差大的探测单元,发现不准

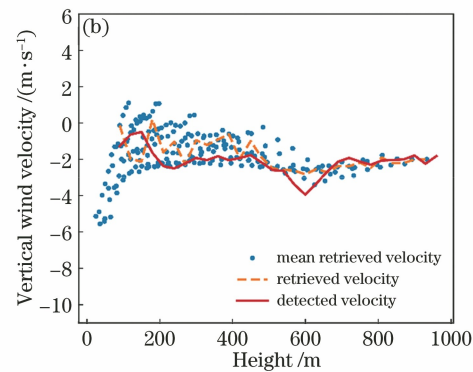


图 8 本文算法反演得到的垂直速度( $V^{(z)}$ )与激光雷达垂直波束探测数据的比较结果。(a)局地变分反演结果与激光雷达垂直波束探测数据的比较;(b)全局变分反演结果与激光雷达垂直波束探测数据的比较

Fig. 8 Comparison between the retrieved vertical wind speed ( $V^{(z)}$ ) and the lidar observed data. (a) Comparison between the retrieval results of local variation and the lidar observed data; (b) comparison between the retrieval results of global variation and the lidar observed data

确的垂直速度反演结果大多来自低仰角波束,这一现象与图 3(b)和图 3(d)的结论一致。这是由于在雷达实际工作中,低仰角位置处的径向速度包含的垂直速度的信息少,因此由局部变分法得到的垂直速度易受观测误差的影响。

通过全局变分调整后,高度低的探测单元垂直速度的反演波动变小,说明连续性和平滑性惩罚项提供了更多的垂直速度信息,均方根误差减小至  $x_{RMSE}(V^{(z)})=0.83 m/s$ ,在高度达到 200 m 后,反演的垂直速度与真实的探测速度接近。

## 5 结 论

本文提出了一种基于单部激光雷达的三维风场局地/全局变分反演算法。基于分析体积单元内风场均匀的假设,本文算法首先在分析体积内构建局地变分法,用于反演三维风速,然后将局地变分法反演的三维速度作为迭代初值,在激光雷达扫描区域内通过全局变分法对初值进行调整,在全局变分法中选用质量连续性方程和平滑项作为惩罚项。由于局地变分法中已隐含了“激光雷达观测径向速度为风速在径向上的投影”这一约束,因此在调整过程中无须添加观测项作为惩罚项,有效减少了全局变分

的计算量。在本文算法的反演过程中,直接在激光雷达扫描空间中建立分析体积单元进行计算,无须将探测单元插值到笛卡儿坐标系,避免了插值误差对反演结果的影响。

本文通过构建仿真实验,分析了观测误差和模式误差对局地变分法性能的影响。通过分析发现:增大分析体积单元的方位角跨度可以减小风场的反演误差,起到平滑滤波的作用,进而提出根据风场的均匀性,自适应选择分析体积单元方位角跨度的方法;水平风场的误差集中在高仰角位置处,而垂直风场的误差集中在低仰角位置处。将本文算法迭代 10 次并与传统两步变分法收敛后的结果进行比较,发现本文算法反演得到的三维风速均方根误差在较均匀风场情况下平均降低 1.49 m/s,在不均匀风场情况下平均降低 1.19 m/s,由此验证了方法的优良性能。通过探空气球和激光雷达垂直向上的扫描对比实验,验证了本文算法反演水平和垂直风场的性能,发现反演的水平和垂直速度均与真实探测速度接近,且连续性和平滑性约束可以提供更多的垂直速度信息。

### 参 考 文 献

- [1] Nijhuis A C P O, Thobois L P, Barbaresco F, et al. Wind hazard and turbulence monitoring at airports with lidar, radar, and mode-S downlinks: the UFO project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(11): 2275-2293.
- [2] Veers P, Dykes K, Lantz E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): eaau2027.
- [3] Hua Z Q, Li Q, Huang X, et al. Analysis of the typical application of laser wind measurement radar in aviation support [J]. Laser Technology, 2020, 44(5): 600-604.  
华志强, 黎倩, 黄轩, 等. 激光测风雷达在航空保障中的典型应用分析 [J]. 激光技术, 2020, 44(5): 600-604.
- [4] Chan P W, Shun C M, Wu K C. Operational LIDAR-based system for automatic windshear alerting at the Hong Kong International Airport[C]// 12nd Conference on Aviation, Range, & Aerospace Meteorology, January 29-February 2, 2006, Atlanta, GA, USA. Washington, D. C.: American Meteorological Society, 2006.
- [5] 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.
- [6] Gao H, Li J B, Chan P W, et al. Parameter-retrieval of dry-air wake vortices with a scanning Doppler lidar [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16377-16392.
- [7] Li J B, Shen C, Gao H, et al. Path integration (PI) method for the parameter-retrieval of aircraft wake vortex by lidar [J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4286-4306.
- [8] Wang H, Barthelmie R J. Wind turbine wake detection with a single Doppler wind lidar [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 625: 012017.
- [9] Cherukuru N W, Calhoun R, Krishnamurthy R, et al. 2D VAR single Doppler lidar vector retrieval and its application in offshore wind energy [J]. Energy Procedia, 2017, 137: 497-504.
- [10] Zhou Y Z, Wang C, Liu Y P, et al. Research progress and application of coherent wind lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 020001.  
周艳宗, 王冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 020001.
- [11] Zhang P C, Dai T P, Du B Y. Radar meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.  
张培昌, 戴铁丕, 杜秉玉. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [12] Srivastava R C, Matejka T J, Lorello T J. Doppler radar study of the trailing anvil region associated with a squall line [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986, 43(4): 356-377.
- [13] Tao Z Y. A study of Doppler radar VAD technique [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995(1): 109-113.  
陶祖钰. 关于 Doppler 雷达 VAD 技术的讨论 [J]. 应用气象学报, 1995(1): 109-113.
- [14] Tao Z Y. A test of wind field retrieval from single Doppler observation for a cold front case [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1995(2): 142-149.  
陶祖钰. 以单多普勒雷达观测资料反演冷锋流场的试验 [J]. 热带气象学报, 1995(2): 142-149.
- [15] Tao Z Y. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 50(1): 81-90.  
陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法 [J]. 气象学报, 1992, 50(1): 81-90.
- [16] Zhou Z B, Min J Z, Peng X Y, et al. Extended-VAP method for retrieving wind field from single-Doppler radar ( I ): methods and contrast experiment [J].



- Plateau Meteorology, 2006, 25(3): 516-524.
- 周振波, 闵锦忠, 彭霞云, 等. 单多普勒雷达风场反演的扩展 VAP 方法(I): 方法与对比试验[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 516-524.
- [17] Xie Q L. An asymmetric VAP wind field retrieval algorithm for single Doppler weather radar [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(3): 98-101.
- 谢千里. 单多普勒天气雷达非对称 VAP 风场反演算法[J]. 装备制造技术, 2020(3): 98-101.
- [18] Mei J, Liang X D, Lü H Y. Experiments on the IVAP single-Doppler radar wind retrieval method[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(1): 48-54.
- 梅珏, 梁旭东, 吕环宇. 单 Doppler 雷达 IVAP 风场反演试验[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(1): 48-54.
- [19] Bai J, Tao Z Y. The pre-processing of Doppler radar wind retrieval VAP technique[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(1): 21-26.
- 白洁, 陶祖钰. 多普勒雷达风场反演 VAP 方法的资料预处理[J]. 应用气象学报, 2000, 11(1): 21-26.
- [20] Feng C Z, Wu S H, Liu B Y. Research on wind retrieval method of coherent Doppler lidar and experimental verification [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0410001.
- 冯长中, 吴松华, 刘秉义. 相干多普勒激光雷达风场反演方法研究与实验印证[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0410001.
- [21] Liang X, Wang B. An integrating VAP method for single-Doppler radar wind retrieval [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 23(2): 166-174.
- [22] 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.
- [23] Waldteufel P, Corbin H. On the analysis of single-Doppler radar data [J]. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(4): 532-542.
- [24] Wei M, Li N. Three dimension wind retrieval of single-Doppler radar data with improved VVP method [C]//2009 First International Conference on Information Science and Engineering, December 26-28, 2009, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2009: 5276-5278.
- [25] Koscielny A J, Doviak R J, Rabin R. Statistical considerations in the estimation of divergence from single-Doppler radar and application to prestorm boundary-layer observations [J]. Journal of Applied Meteorology, 1982, 21(2): 197-210.
- [26] Wei M, Liu G Q, Wang C G, et al. Optimal selection for the weighted coefficients of the constrained variational problems [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2003, 24(8): 827-834.
- 魏鸣, 刘国庆, 王成刚, 等. 一类含有约束的变分问题中权重因子的最优选取[J]. 应用数学和力学, 2003, 24(8): 827-834.
- [27] Li N, Wei M, Tang X W, et al. An improved velocity volume processing method[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(5): 893-906.
- [28] Li N, Wei M, Yu Y J, et al. Evaluation of a support vector machine-based single-Doppler wind retrieval algorithm[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2017, 34(8): 1749-1761.
- [29] Li N, Wei M, Mu X Y, et al. A support vector machine-based VVP wind retrieval method [J]. Atmospheric Science Letters, 2015, 16(3): 331-337.
- [30] Boccippio D J. A diagnostic analysis of the VVP single-Doppler retrieval technique [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 12(2): 230-248.
- [31] Lang X X, Wei M, Ge W Z, et al. A new method of retrieving windfield using single Doppler radar [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2001, 21(4): 417-424.
- 郎需兴, 魏鸣, 葛文忠, 等. 一种新的单多普勒雷达风场反演方法[J]. 气象科学, 2001, 21(4): 417-424.
- [32] Yu Y M, Feng Q H, Xie M, et al. A study of VVP algorithm for 3D wind retrieval [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(2): 321-326.
- 余艳梅, 冯启航, 谢明, 等. VVP 三维风场反演方法研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(2): 321-326.
- [33] Jiang L H, Fan D B, Zhuang Z B, et al. Research of airport microscale wind field retrieval with single Doppler lidar[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(11): 1168-1172.
- 蒋立辉, 范道兵, 庄子波, 等. 单多普勒激光雷达机场小尺度风场反演研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1168-1172.
- [34] Yang Y. Study on the techniques for assimilation of Doppler radar data [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 1-10.
- 杨毅. Doppler 雷达资料同化技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 1-10.
- [35] Caya D, Zawadzki I. VAD analysis of nonlinear wind fields [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1992, 9(5): 575-587.
- [36] Wan R, Tang D Z, Zhang P, et al. VAD elementary analysis of nonlinear wind field [J]. Scientia

- Meteorologica Sinica, 2003, 23(3): 314-324.  
万蓉, 汤达章, 张鹏, 等. 非线性风场的 VAD 分析初探[J]. 气象科学, 2003, 23(3): 314-324.
- [37] Shao A M, Qiao X S, Qiu C J. Criteria of quality control for VAD winds [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(5): 57-62.  
邵爱梅, 乔小澍, 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.
- [38] Ma J W, Qin S X, Wang H Y, et al. Research and experiment of data assimilation algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2013.  
马建文, 秦思娴, 王皓玉, 等. 数据同化算法研发与实验[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [39] Scialom G, Lemaître Y. A new analysis for the retrieval of three-dimensional mesoscale wind fields from multiple Doppler radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(5): 640-665.
- [40] Gao J D, Xue M, Brewster K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(3): 457-469.
- [41] Gao J D, Xue M, Shapiro A, et al. A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars[J]. Monthly Weather Review, 1999, 127(9): 2128-2142.
- [42] Qiu C J, Shao A M, Liu S, et al. A two-step variational method for three-dimensional wind retrieval from single Doppler radar[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2006, 91(1/2/3/4): 1-8.
- [43] Chan P W, Shao A M. Depiction of complex airflow near Hong Kong International Airport using a Doppler LIDAR with a two-dimensional wind retrieval technique [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2007, 16(5): 491-504.
- [44] Rihan F A, Collier C G, Roulstone I. Four-dimensional variational data assimilation for Doppler radar wind data [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2005, 176(1): 15-34.
- [45] Xu Q, Wei L, Gu W, et al. A 3.5-dimensional variational method for Doppler radar data assimilation and its application to phased-array radar observations [J]. Advances in Meteorology, 2010, 2010: 1-14.
- [46] Burgers G, van Leeuwen P J, Evensen G. Analysis scheme in the ensemble Kalman filter [J]. Monthly Weather Review, 1998, 126(6): 1719-1724.
- [47] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99 (C5): 10143-10162.
- [48] Evensen G. The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation [J]. Ocean Dynamics, 2003, 53(4): 343-367.
- [49] Wan Q L. The multi-scale/block batch-wise variational data assimilation and application in forming tropical cyclone initial circulation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014: 1-40.  
万齐林. 多尺度/分块变分资料同化技术及其在热带气旋初值形成中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014: 1-40.
- [50] Leng H Z. Study on the ensemble-based variational data assimilation and its parallel implementation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 1-8.  
冷洪泽. 集合变分资料同化关键技术及其并行算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 1-8.
- [51] Gao J, Xue M, Lee S Y, et al. A three-dimensional variational single-Doppler velocity retrieval method with simple conservation equation constraint [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2006, 94(1/2/3/4): 11-26.
- [52] 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.