

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.XXXX.XX.01

基于相对总变分模型的测风激光雷达二维风场反演

张硕¹, 顾元豪¹, 袁金龙^{1*}, 杜宇涵¹, 夏海云¹, 陈朝勇², 魏媛媛², 武腾飞²

(1.南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2.中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100080)

摘要: 为解决传统速度-方位处理(Velocity-Azimuth Processing, VAP)算法在二维风场反演中存在的风速失真问题, 引入相对总变分模型对其进行改进。基于风速失真与径向风速的相关性, 构建阈值判据识别失真区域, 并对该区域进行修正; 采用相对总变分模型消除修正过程中引入的不规则纹理, 提取二维风场的全局结构分量; 进一步结合真实径向风速的纹理信息, 恢复二维风场局部纹理特征。研究表明: 改进后的算法能够有效地修正 VAP 算法存在的风速失真问题, 与 VAP 算法初步反演结果相比, 结合相对总变分模型的 VAP 算法的风速反演结果均方根误差降低了 0.42 m/s, 风向反演结果均方根误差降低了 4.85°, 有效提高了风场反演结果的准确性。

关键词: 测风激光雷达; 风场反演; 相对总变分模型; VAP 算法; 图像处理; 纹理特征; 失真修正; 正则化方法

中图分类号: TB9; TN95; P414.7 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795(XXXX)XX-0001-10

Two-dimensional wind field retrieval for wind Lidar based on relative total variation model

ZHANG Shuo¹, GU Yuanhao¹, YUAN Jinlong^{1*}, DU Yuhan¹, XIA Haiyun¹, CHEN Chaoyong²,
WEI Yuanyuan², WU Tengfei²

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100080, China)

Abstract: To address the issue of wind-speed distortion in the two-dimensional (2D) wind retrieval using traditional velocity-azimuth processing (VAP) algorithm, the relative total variation (RTV) model is incorporated to improve the algorithm. Based on the correlation between wind-speed distortion and radial wind speed, a threshold is established to identify distorted regions, enabling subsequent correction. Then the RTV model is employed to eliminate irregular textures generated during the correction process, and extract the 2D overall wind structure. Furthermore, the local texture features of 2D wind field are reconstructed by combining the texture information from the actual radial wind speed. Experimental results demonstrate that the improved algorithm can effectively mitigate the wind-speed distortion issue in VAP algorithm. Compared to the preliminary results retrieved by VAP algorithm, the improved algorithm reduces root mean square error by 0.42 m/s for wind speed and 4.85° for wind direction, significantly improving the accuracy of wind retrieval.

收稿日期: 2025-09-23; 修回日期: 2025-12-10

基金项目: 航空科学基金项目(202300220R2001); 国家自然科学基金青年项目(42405137); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20230434)

引用格式: 张硕, 顾元豪, 袁金龙, 等. 基于相对总变分模型的测风激光雷达二维风场反演[J]. 计测技术, XXXX, XX(XX): 1-10.

Citation: ZHANG Shuo, GU Yuanhao, YUAN Jinlong, et al. Two-dimensional wind field retrieval for wind Lidar based on relative total variation model [J]. Metrology & Measurement Technology, XXXX, XX (XX): 1-10.



Key words: wind lidar; wind retrieval; relative total variation model; VAP algorithm; image processing; texture feature; distortion correction; regularization method

0 引言

大气风场的精准探测对气象预报、航空航海安全、气候研究等领域具有重大意义^[1]。相干多普勒测风激光雷达凭借高时空分辨率和精准径向风探测能力^[2]，在大气风场^[3-4]监测领域具有显著优势^[5]。测风激光雷达^[6]在低空风场探测^[7-8]、风切变的识别^[9-10]和预警^[11]等领域有着广泛应用。但测风激光雷达仅能直接探测径向风速，需通过风场反演技术重建二维或三维风场结构。国内外学者在风场反演算法领域已开展大量深入研究与实验，形成多类反演方法体系。LHERMITTE等人^[12]提出的速度方位显示(Velocity Azimuth Display, VAD)方法通过单雷达径向风速提取风场信息，获取平均风速及平均风向信息。在此基础上，BROWNING等人^[13]引入线性假设，CAYA等人^[14]对VAD技术在非线性假设下的研究，提高了非线性风场下的反演效果。但程浩^[15]指出在理想线性风场条件下，VAD反演结果本质上是雷达正上方平均风，存在适用性局限。胡文等人^[16]提出梯度VAD方法，克服了传统VAD方法的局限性，但是会放大径向风速梯度误差。魏敏等人^[17]结合扩展卡尔曼滤波方法，增强梯度VAD方法的稳定性，提高了反演精度。WALDTEUFEL等人^[18]提出的体速度处理方法(Volume Velocity Processing, VVP)算法适用于三维风场重建，但是需要进行大量矩阵运算，易产生病态问题。LI等人^[19]提出分步的体速度处理(StepVolumeVelocityProcessing, SVVP)方法，优化了计算流程，可降低病态矩阵带来的误差。高航等人^[20]结合高阶泰勒展开的非线性模型，提升反演算法的性能。结合热力学方程和动力学方程，SUN等人^[21]提出四维变分同化方法，利用全伴随函数反演三维风场。王改利等人^[22]通过实验验证了四维变分同化方法相较三维变分同化方法在近海面风场探测的优势。高航等人^[23]在传统三维变分同化方法的基础上，进一步提出局部/全局变分法，计算性能显著优于两步变分同化方法。在二

维风场反演的研究方面，传统的速度-方位处理(Velocity-Azimuth Processing, VAP)方法^[24]具有计算简单的优点，但其存在较大计算误差。白洁等人^[25]改进了VAP方法的风速计算公式，提高了反演准确性。LIANG^[26]提出了积分VAP(Integral Velocity Azimuth Processing, IVAP)方法，利用扇区方位角数据提升了算法稳定性。姚晓娟等人^[27]的研究表明：基于IVAP方法的组网雷达风场反演在实际业务中有较好的应用前景。

当前风场反演的核心问题在于精度、效率与分辨率难以协同优化，传统VAP算法效率高，但对径向风速变化敏感，常规平滑处理并不能解决这一问题。基于此，本文引入图像结构提取技术，通过径向风速绝对差值阈值判据以及结构提取算法，修正风速高估区域，并结合径向风速识别真实风场特征，重构更高精度的二维风场，提高风场反演准确性。

1 算法理论基础

1.1 VAP风场反演算法

应用VAP算法时，风矢量为 \mathbf{V} ，风矢量的方向与向径方向的夹角为 α ，并规定从向径方向到风矢量方向顺时针转动为正方向，即 $\alpha > 0$ 。 \mathbf{V} 和水平径向风速 C 之间的关系如图1所示，其中， θ 为方位角(定义为正北方向顺时针旋转的角度)， $\Delta\theta$ 为单位方位角。有以下数学关系

$$C = -V\cos\alpha \quad (1)$$

实际的 α 的取值范围为 $(-\pi, \pi)$ ，故 $C \geq 0$ 表示风趋近雷达， $C < 0$ 表示风远离雷达。

设 A 、 B 两点为 O 点同一距离圈上相隔 $\Delta\theta$ 的两点，假设三点的风矢量是相同的， C_1 、 C_2 分别为 A 、 B 两点的水平径向风速，则

$$\begin{cases} C_1 = -V\cos\alpha_1 \\ C_2 = -V\cos\alpha_2 \end{cases} \quad (2)$$

从图1可以看出： $\alpha_1 = \alpha - \Delta\theta$ ， $\alpha_2 = \alpha + \Delta\theta$ 。式(2)可以展开为

$$\begin{cases} C_1 = -V(\cos\alpha\cos\Delta\theta + \sin\alpha\sin\Delta\theta) \\ C_2 = -V(\cos\alpha\cos\Delta\theta - \sin\alpha\sin\Delta\theta) \end{cases} \quad (3)$$

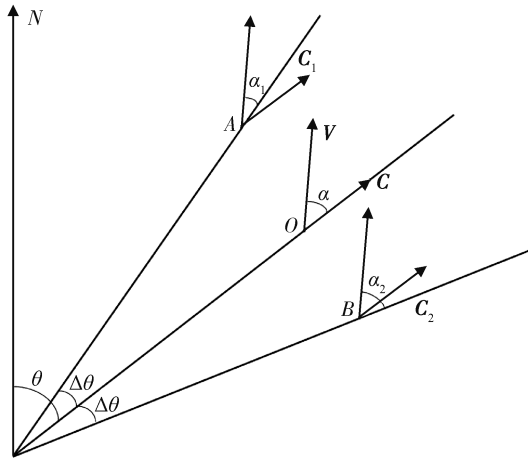


图1 V和水平径向风速C之间的关系

Fig.1 Relationship between V and horizontal radial velocity C

在雷达仰角很小的情况下，式(3)中的 C_1 、 C_2 可近似用雷达低仰角观测到的径向风速 V_{r1} 、 V_{r2} 替代，则可以推导出风矢量相较径向的偏角 α 为

$$\tan\alpha = -\frac{V_{r1} - V_{r2}}{V_{r1} + V_{r2}} \cot\Delta\theta \quad (4)$$

当 $V_{r1} + V_{r2} = 0$ 时，则 $\alpha = \pm(\pi/2)$ 。采用白洁等人^[25]给出的风速计算公式反演得到水平风速，即

$$V = \left| \frac{-V_{r1} \sin(\alpha + \Delta\theta) + V_{r2} \cos(\alpha - \Delta\theta)}{\sin(2\Delta\theta)} \right| \quad (5)$$

反正切函数的主值范围限定在 $(-\pi/2, \pi/2)$ ，而式(1)中 α 为 $(-\pi, \pi)$ ，因此，计算 $V = ui + vj$ 中的 u 和 v 时 (u 和 v 分别为风矢量在东西向和南北向上的分量， i 和 j 分别为东向和北向的单位方向矢量)，分为不同情况讨论：当 $V_{r1} + V_{r2} < 0$ 时， $u = V\sin(\theta + \alpha)$ ， $v = V\cos(\theta + \alpha)$ ；当 $V_{r1} + V_{r2} > 0$ 时， $u = V\sin(\theta + \pi + \alpha)$ ， $v = V\cos(\theta + \pi + \alpha)$ 。

1.2 图像结构提取算法

经典的结构-纹理分解方法通过使用总变分 (Total Variation, TV) 正则化器来保留边缘，该方法不需要大量的纹理信息。AUJOL 等人^[28]对四种 TV 模型的研究表明：ROF (Rudin-Osher-Fatemi) 模型 F_{ROF} 在未知纹理模式下的效果是最优的，其采用二次惩罚来增强输入数据和输出数据的结构一致性，表示为

$$F_{ROF} = \arg \min_S \sum_p \left\{ \frac{1}{2\lambda} (S_p - I_p)^2 + |(\nabla S)_p| \right\} \quad (6)$$

式中： S 为输出的结构图像， S_p 为输出图像中像素位置 p 处的像素值， I_p 为输入图像中像素位置 p 处

的像素值。数据项 $(S_p - I_p)^2$ 的作用是确保输入值与结果值之间不产生显著偏差。 $\sum_p |(\nabla S)_p|$ 是 TV 正则化器，可以写为： $\sum_p |(\nabla S)_p| = \sum_p (|\partial_x S_p| + |\partial_y S_p|)$ ，是二维各向异性表达式。

然而，总变分正则化器区分边缘和纹理的能力有限，在总变分模型的基础上，相对总变分 (Relative Total Variation, RTV) 模型引入了新的正则器，可分解图像中的结构和纹理信息，并且没有假定特定类型的纹理，适用于处理非均匀性和各项异性的纹理。相对总变分模型 F_{RTV} ^[29] 表示为

$$F_{RTV} = \arg \min_S \sum_p (S_p - I_p)^2 + \lambda \cdot \left(\frac{D_x(p)}{L_x(p) + \varepsilon} + \frac{D_y(p)}{L_y(p) + \varepsilon} \right) \quad (7)$$

式中： λ 为权重因子； $D_x(p)$ 和 $D_y(p)$ 为窗口总变分，计算窗口的绝对空间变化； $L_x(p)$ 和 $L_y(p)$ 为窗口固有变分，表示全局空间变化特征； ε 为参数，它是一个很小的正数，以避免除数为 0。相对总变分算法能够有效突出图像的主要结构特征。

将惩罚项展开并重新排列，式(7)可以写为

$$F_{RTV} = (v_s - v_l)^T (v_s - v_l) + \lambda (v_s^T A_x^T U_x W_x A_x v_s + v_s^T A_y^T U_y W_y A_y v_s) \quad (8)$$

式中： v_s 和 v_l 分别为 S_p 和 I_p 的向量化形式， A_x 和 A_y 为基于前向差分的离散梯度算子的 Toeplitz 矩阵， U_x 、 U_y 、 W_x 、 W_y 为对角矩阵。

通过将目标函数分解为非线性项和二次项，该算法能够获得数值稳定的近似解。这种特性在快速估计结构和纹理图像处理中具有显著的优势。

基于前次迭代获取的结构图像 S 估计值构建式(8)中的 U_x 、 U_y 、 W_x 、 W_y ，将每次迭代中的最小化过程转化为求解以下线性系统

$$(E + \lambda L') \cdot v_s^{t+1} = v_l \quad (9)$$

式中： E 为单位矩阵， L' 为权重矩阵， $(E + \lambda L')$ 为对称正定的拉普拉斯矩阵。在低仰角 PPI 扫描条件下，雷达所测风速普遍受到大气湍流的影响，湍流在时间和空间上具有各向异性的特征，而背景风场通常连续且平滑。这种差异使风速场图像形成了类似“结构 + 纹理”的特点，RTV 模型能够将图像中各向异性的纹理与结构分离^[29]，因此，

通过风场数据到风速场图像的数据格式转换，能够将风场分离为全局结构分量和局部纹理分量。

2 基于图像处理的二维风场反演技术

本文首先基于VAP算法对风场进行初步反演，反演结果存在风速失真问题，将相邻方位角的径向风速差值作为风速失真区域的判据，并对失真区域进行修正。修正过程易导致风场产生不规则纹理，基于RTV模型提取风场全局结构分量，并滤除不规则纹理；同时，基于雷达真实探测径向风速，采用RTV模型获取其局部纹理分量，并将其转换至二维风场纹理特征，提高反演风场的空间分辨力。图2描述了整个算法流程。

Step1: 基于VAP算法初步反演二维风矢量。

VAP算法出现较大误差主要有两个原因：

① 该算法计算时对径向风速的变化很敏感；② 在式(5)中，当选取的单位方位角 $\Delta\theta$ 较小时，计算结果容易出现较大的数值，产生较大误差^[30]。针对

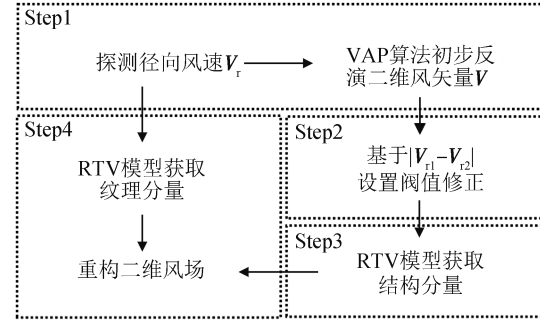


图2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flow chart

原因①，本文算法在反演风场前，对径向风速沿径向和切向分别做6次三点平滑，以滤除径向风速中的不规则脉动；针对原因②，本文进行VAP反演时取 $\Delta\theta = 8^\circ$ ，以降低风速反演误差。

通过数值模拟一个具有显著风切变的风场，如图3所示。VAP初步反演结果在径向风速梯度较大的区域出现显著风速失真，导致了反演风速存在较大误差。为解决此问题，针对风速失真区域引入相应的修正算法。

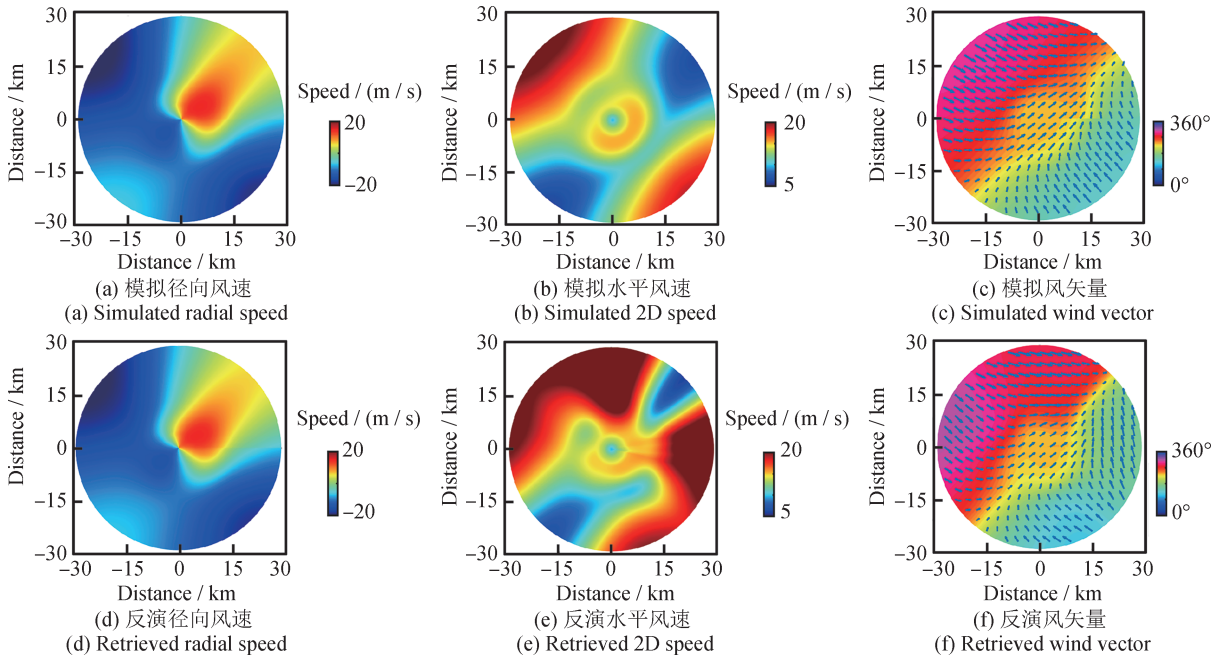


图3 模拟风场与VAP反演的风场

Fig.3 Simulated wind field and wind field retrieved by VAP algorithm

Step2: 修正风速失真区域。

如图4所示，在VAP算法反演的过程中，反演风速大小与 $|V_{r1} - V_{r2}|$ 存在一定的正相关关系，且当 $|V_{r1} - V_{r2}|$ 数值较大时，会出现显著的风速误差。

本文提出设置阈值的修正方法，修正后的风速

$V_{修正后}$ 计算公式为

$$V_{修正后} = V_{修正前} + w \cdot |V_{r1} - V_{r2}| \quad (10)$$

式中： $V_{修正前}$ 为修正前的风速， w 为权重系数。 w 的

计算公式为

$$w = \begin{cases} 0, & |V_{r1} - V_{r2}| \leq T \\ c, & |V_{r1} - V_{r2}| > T \end{cases} \quad (11)$$

式中： c 为常数， T 为设置的临界阈值。当 $|V_{r1} - V_{r2}|$ 超过设定的临界阈值时，基于其超出幅度对失

真的风速区域进行修正，抑制风速误差。由于难以通过平滑处理完全滤除不规则脉动，导致风场反演中易产生风向异常摆动误差。故分别对反演风速的 u 和 v 分量进行二维平滑处理，以抑制风向反演误差。

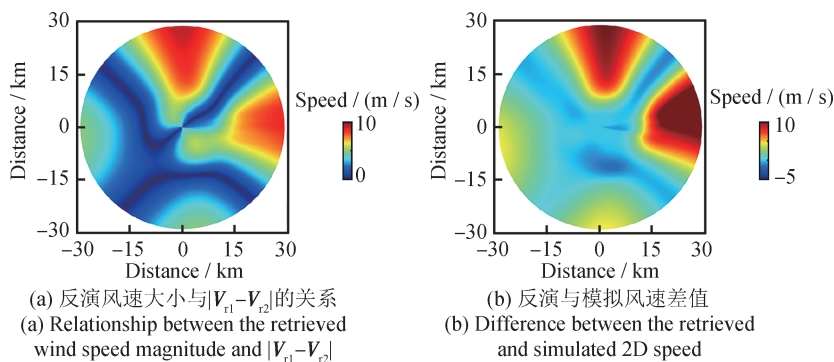


图4 反演风速大小与 $|V_{r1} - V_{r2}|$ 的关系以及VAP算法反演的水平风速与模拟水平风速的差值

Fig.4 Relationship between the retrieved wind speed magnitude and $|V_{r1} - V_{r2}|$ and the difference between two-dimensional (2D) wind speed retrieved by the VAP algorithm and the simulated 2D wind speed

图5展示了真实反演案例中的 c 、 T 敏感性分析结果。RTV模型主要作用于局部纹理细节，其对整体重构风场均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE) R_{RMSE} 的贡献相对有限，因此，当 λ 取不同值时，不同权重与阈值条件下对应的重构风场 R_{RMSE} 变化特征基本保持一致。基于图5的分析结果表明：当 $c \in [-0.7, -0.5]$ 且 $T \in [2, 2.5]$ m/s时，反演结果对参数的扰动展现出较强的鲁棒性；当 $c = -0.6$ 且 $T = 2.25$ m/s时， R_{RMSE} 取最小值。

Step3: 基于RTV模型提取风场的全局结构分量。

如图6(a)所示，风速失真区域的修正能有效

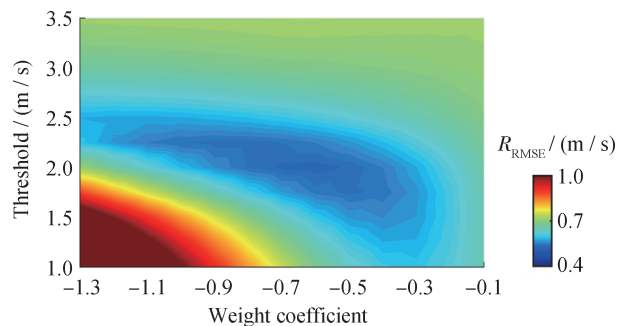


图5 不同权重系数及阈值判据组合下重构风场的 R_{RMSE}
Fig.5 R_{RMSE} of the reconstructed wind field under different combinations of weight coefficients and threshold criteria

抑制VAP反演风速的计算误差，但在修正过程中会引入不规则纹理。若直接采用传统的平滑滤波器对其进行抑制，会模糊真实风场结构，导致风速极值信息的损失。而RTV模型基于图像的局部梯度信息与全局空间变化特征进行分析，在保持风场连续结构的同时，能有效滤除各项异性的不规则纹理，提供更加准确的风场整体结构特征。

在RTV模型中， λ 用于控制正则化结果的平滑程度，如图6(b)和(c)所示，随着 λ 的增大，图像的平滑效果逐渐增强，对不规则纹理的过滤也逐渐增强。RTV模型对全局参数的贡献相对有限，因此，基于Step3的参数敏感性进一步分析 λ 对修正区域的误差影响(如图7所示)，结果表明：不同的权重与阈值组合下对应的最小 R_{RMSE} 随 λ 的增加呈现先减少后增加的趋势。二次拟合曲线表明：当 $\lambda \approx 0.1$ 时， R_{RMSE} 取得极小值。为了在保持水平风速全局主要结构完整性的同时，有效抑制不规则纹理，本文选取 $\lambda = 0.1$ 。

Step4: 恢复二维风场的局部纹理特征。

基于雷达真实探测的径向风速，通过RTV模型分离并获取径向风速的局部纹理分量，并基于二维风场和径向风速的矢量关系，将径向风速的

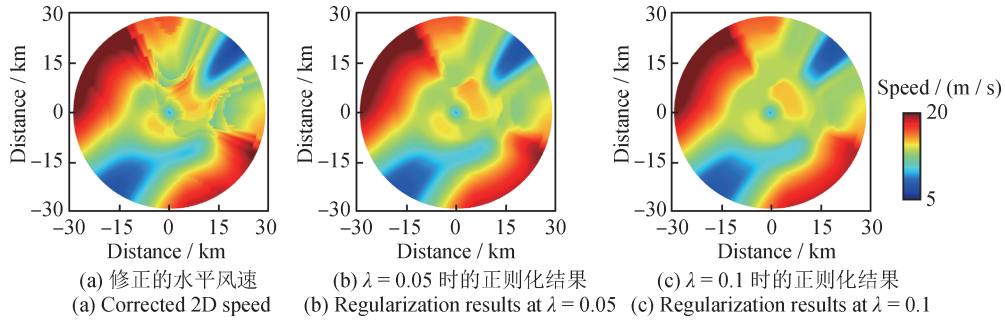


图6 修正后的水平风速与不同λ取值下的正则化结果
Fig.6 Corrected 2D wind speed and regularization results under different λ values

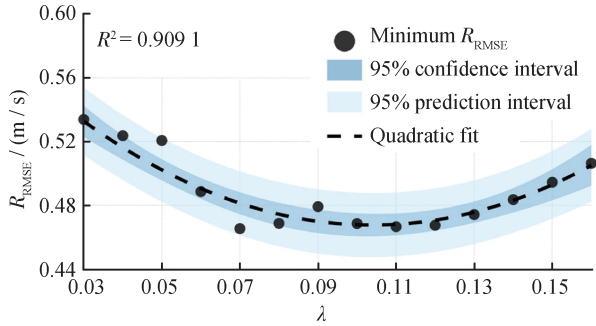


图7 不同权重与阈值判据组合下最小 R_{RMSE} 随λ的变化及其拟合曲线
Fig.7 Variation of minimum R_{RMSE} with λ under different combinations of weights and threshold criteria and its fitting curves

纹理分量转换为水平风速的纹理分量。进一步将水平风速局部纹理分量与RTV模型滤除不规则纹理后的全局结构分量相结合，实现二维风场的精细纹理重建。

基于RTV模型提取风场的全局结构分量，在滤除不规则纹理噪声的同时，也导致风场丧失了真实纹理特征。因此，在本步骤中重新构建风场的纹理。风场的纹理分量以及重构的水平风速如图8所示。研究表明：纹理重建能够恢复部分区域风场纹理特征，例如图8(c)右上区域的低风速区域，进一步提高了反演风场的准确性。

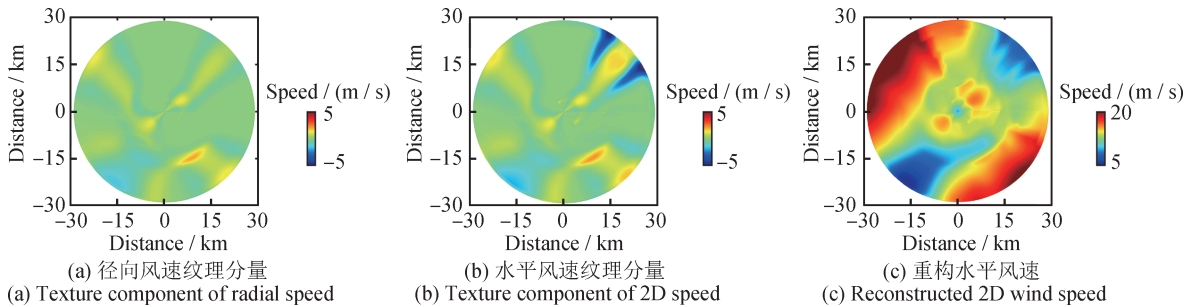


图8 风场的纹理分量以及重构的水平风速
Fig.8 Texture components of the wind field and the reconstructed 2D wind speed

3 应用分析

基于二维变分法的风矢量反演方法的可靠性在之前的工作中已经得到验证^[31]。将测风激光雷达在外场实验中实测的大气风场作为参考速度，变分法反演的水平风速和风向作为参考水平风速和参考风向。参考风场、VAP直接反演的风场以及重构的风场如图9所示。本实验中，VAP初步反演结果的水平风速的平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE) M_{MAE} 为0.57 m/s, R_{RMSE} 为0.86 m/s,

水平风向的 M_{MAE} 为 8.09° , R_{RMSE} 为 12.72° ，初步反演结果在径向风速梯度较大的区域出现了明显的风速高估现象。采用式(10)构建的阈值判据抑制风速误差，并采用相对总变分模型提取修正后的风速全局结构分量；引入径向风速的局部纹理分量，恢复风场的局部纹理特征。采用本文算法重构以后的风场反演结果水平风速的 M_{MAE} 和 R_{RMSE} 分别为0.32 m/s和0.44 m/s，水平风向的 M_{MAE} 和 R_{RMSE} 分别为 4.97° 和 7.87° 。相较VAP初步反演结果，水平风速的 M_{MAE} 和 R_{RMSE} 分别降低了0.25 m/s

和 0.42 m/s, 水平风向的 M_{MAE} 和 R_{RMSE} 分别降低了 3.12° 和 4.85°, 验证了本文算法的有效性。

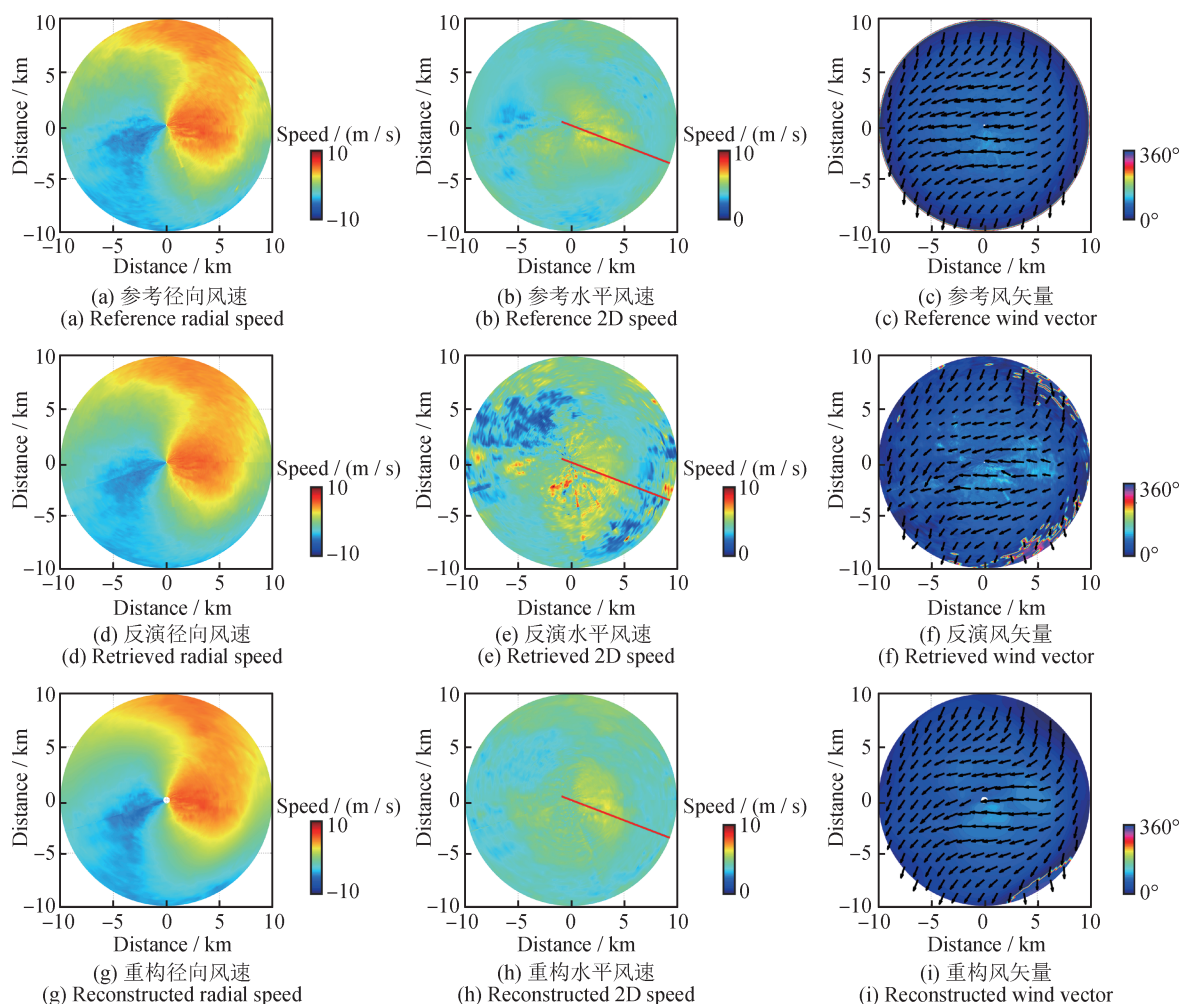


图9 参考风场、VAP直接反演的风场以及重构的风场

Fig.9 Reference wind field, wind field directly retrieved by VAP algorithm and reconstructed wind field

在特定方位角(图9中红色标记线所示方位)处,对参考风场、VAP初步反演风场和重构风场的风速和风向分布进行对比分析(如图10所示),重构风场与参考风场在风速分布上的一致性显著优于VAP初步反演风场。研究表明:本文算法在有效降低风速误差的同时,亦能较好地恢复局部风场的纹理特征。根据风向分布曲线分析,重构风场与参考风场同样具有更优的一致性,有效抑制了VAP反演结果中的异常风向摆动误差。

为了进一步验证本文算法的有效性,对比分析参考风场、VAP初步反演风场和重构风场在径向和切向上风速最值的差异,结果如图11所示,可以看出:本文算法有效抑制了传统VAP方法产生的风速误差,在相同距离圈或方位角条件下,

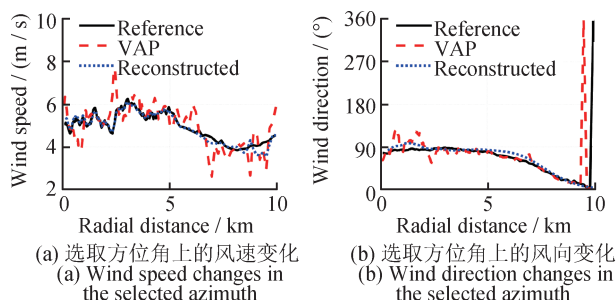


图10 参考风场、VAP反演风场和重构风场在选取方位角上的风速变化和风向变化

Fig.10 Wind speed and direction changes in the selected azimuth of the reference wind field, VAP retrieved wind field and reconstructed wind field

重构风场的风速极值较VAP反演结果显著改善,其分布特征与真实风场展现出更优的一致性。

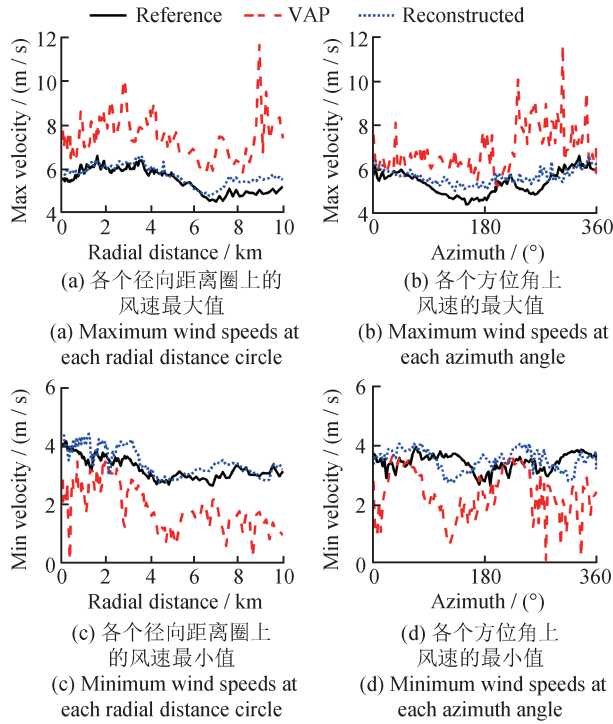


图11 参考风场、VAP反演风场和重构风场在每个径向距离圈上的风速最值分布以及每个方位角上风速的最值分布
Fig.11 Distribution of maximum and minimum wind speeds of the reference wind field, VAP-retrieved wind field, and reconstructed wind field at each radial range circle and at each azimuth angle

风速显著失真区域内，VAP反演风场和重构风场的风速误差分布如图12所示，风向误差分布如图13所示。该区域风速误差较为显著， R_{RMSE} 为1.20 m/s，最大风速误差达到7.79 m/s，而重构风场有效抑制了风速计算误差，最大风速误差仅为1.90 m/s，且风速的 R_{RMSE} 和 M_{MAE} 分别降低了0.69 m/s和0.50 m/s。在风向误差分布方面，VAP反演结果风向最大误差达到 -175° ，局部区域存在显著的风向异常摆动误差，而重构风场有效抑制风向异常摆动导致的误差，修正后的误差不超过 $\pm 35^\circ$ ， R_{RMSE} 和 M_{MAE} 分别降低了 4.82° 和 3.55° 。上述结果表明：本文算法能够有效抑制风速显著失真区域的反演误差，提升了风场反演的准确性。

4 结论

针对传统VAP风场反演算法在风速计算方面存在局限性的问题，本文提出了一种基于RTV模型的优化方案。通过修正风场失真区域和利用

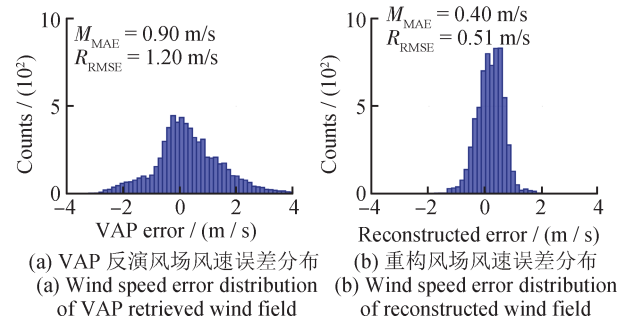


图12 VAP反演风场和重构风场的风速误差分布
Fig.12 Wind speed error distribution of VAP retrieved wind field and reconstructed wind field

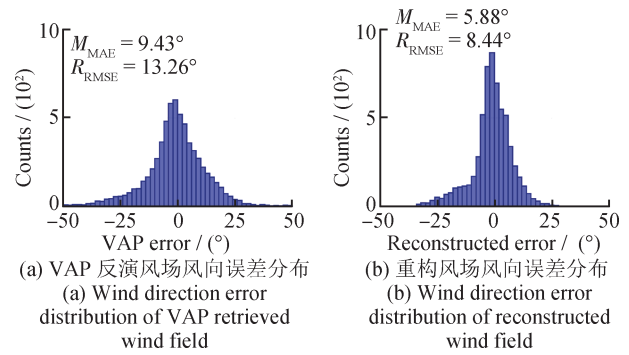


图13 VAP反演风场和重构风场的风向误差分布
Fig.13 Wind direction error distribution of VAP retrieved wind field and reconstructed wind field

RTV模型提取风场全局结构分量两个步骤，有效抑制了传统VAP算法的风速反演误差。然而，全局结构分量过于平滑，难以保留局部细节，因此，本文将真实径向风速的局部纹理分量转化为二维风场的局部纹理分量，并与二维风场全局结构分量相结合，恢复反演风场的纹理结构。与VAP初步反演结果相比，本文算法反演结果的风速 R_{RMSE} 降低了0.42 m/s，风向的 R_{RMSE} 降低了 4.85° ，有效抑制了VAP算法的反演误差，提高了反演结果的准确性。然而，本算法目前所采用的参数均基于经验选取，其适用性有待进一步提升。未来将依托长期积累的雷达实测数据，进一步分析各个参数的适用性，构建参数选取指标体系，针对不同风场特征自适应选取参数。

参考文献

[1] 杜海浪. 多普勒测风激光雷达在航空气象中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(24): 15-27.
DU H L. Application progress of Doppler wind LiDAR in

- aviation meteorology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(24): 15–27. (in Chinese)
- [2] 韩雪, 周晨. 大气探测激光雷达的分类和特征[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2023, 59(5): 900–913.
HAN X, ZHOU C. Classification and features of atmospheric lidars: a review[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2023, 59(5): 900–913. (in Chinese)
- [3] 郑腾飞, 李肖雅, 万齐林, 等. 综合观测试验中的激光测风雷达探测性能分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2024, 19(5): 529–542.
ZHENG T F, LI X Y, WAN Q L, et al. Analysis of detection performance of wind lidar in comprehensive observation experiment[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2024, 19(5): 529–542. (in Chinese)
- [4] 鄢坤, 时晓蒙, 傅刚, 等. 测风激光雷达在青岛低能见度天气下的适用性[J]. *应用气象学报*, 2024, 35(1): 33–44.
YAN S, SHI X M, FU G, et al. Wind lidar applicability in low visibility weather in Qingdao [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2024, 35(1): 33–44. (in Chinese)
- [5] 滕玉鹏, 李斐斐, 夏芸洁, 等. 激光测风雷达与多普勒天气雷达的速度对比与分析[J]. *气象*, 2025, 51(5): 517–528.
TENG Y P, LI F F, XIA Y J, et al. Speed comparison and analysis of wind lidar and Doppler weather radar[J]. *Meteorological Monthly*, 2025, 51(5): 517–528. (in Chinese)
- [6] 陈朝勇, 魏媛媛, 邢帅, 等. 相干多普勒测风激光雷达校准方法研究[J]. *计测技术*, 2025(3): 123–132.
CHEN C Y, WEI Y Y, XING S, et al. Research on the calibration methods for coherent Doppler wind lidar [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025(3): 123–132. (in Chinese)
- [7] 沈淳, 李健兵, 高航, 等. 低空复杂风场全天候雷达精细探测技术[J]. *电子学报*, 2024, 52(4): 1189–1204.
SHEN Chun, LI J B, GAO H, et al. Fine detection technology of all-weather radar for low-altitude complex wind field [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(4): 1189–1204. (in Chinese)
- [8] 任超, 虞健飞, 万威, 等. 测风激光雷达与模型融合的低空风场实时构建研究[J]. *中国激光*, 2025, 52(10): 1010002.
REN C, YU J F, WAN W, et al. Real-time construction of low-altitude wind field based on fusion of wind LiDAR and models [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(10): 1010002. (in Chinese)
- [9] 刘晓明. 激光雷达识别低空风切变的方法和效果[J]. *激光技术*, 2024, 48(3): 416–424.
LIU X M. Methodology and effectiveness of LiDAR in identifying low-level wind shear [J]. *Laser Technology*, 2024, 48(3): 416–424. (in Chinese)
- [10] 丁婕, 张镭, 胡泽勇, 等. 基于激光雷达和航空器报告识别低空风切变及其演变过程研究[J]. *高原气象*, 2023, 42(5): 1338–1350.
DING J, ZHANG L, HU Z Y, et al. Study of low-level wind shear and its evolution based on LiDAR and aircraft reports identification [J]. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(5): 1338–1350. (in Chinese)
- [11] 赵刚, 黄轩, 华志强. 激光雷达低空风切变告警算法的应用研究与分析[J]. *激光技术*, 2025, 49(2): 203–209.
ZHAO G, HUANG X, HUA Z Q. Research and analysis of low-level wind shear warning algorithm in LiDAR [J]. *Laser Technology*, 2025, 49(2): 203–209. (in Chinese)
- [12] LHERMITTE R M. Precipitation motion by pulse Doppler [J]. *Procweather Radar Confamermetearsoc*, 1961: 218–223.
- [13] 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.
- [14] CAYA D, ZAWADZKI I. VAD analysis of nonlinear wind fields [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1992, 9(5): 575–587.
- [15] 程浩. 多普勒天气雷达信息处理中的变分问题与风场反演研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
CHENG H. Variational problem and wind field retrieval research in Doppler weather radar information processing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [16] 胡文, 贾豫东. 基于梯度下降 VAD 方法的风场探测技术[J]. *科技与创新*, 2024(6): 42–44.
HU W, JIA Y D. Wind field detection technology based on gradient descent VAD method [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2024(6): 42–44. (in Chinese)
- [17] 魏敏, 谭思俊. 基于扩展卡尔曼滤波算法的梯度 VAD 技术[J]. *软件导刊*, 2024(12): 106–111.

- WEI MIN TAN S J. Gradient VAD technology based on extended Kalman filter algorithm [J]. *Software Guide*, 2024(12): 106–111. (in Chinese)
- [18] WALDTEUFEL P, CORBIN H. On the analysis of single-Doppler radar data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(4): 532–542.
- [19] 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.
- [20] GAO H, ZHOU J, SHEN C, et al. High-order Taylor expansion for wind field retrieval based on ground-based scanning lidar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4107914.
- [21] SUN J Z, FLICKER D W, LILLY D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-doppler radar data [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1991, 48(6): 876–890.
- [22] 王改利, 刘黎平, 邱崇践, 等. 多普勒激光雷达风场反演方法研究 [J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 143–153.
WANG G L, LIU L P, QIU C J, et al. Research on wind field inversion method of Doppler lidar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(1): 143–153. (in Chinese)
- [23] GAO H, ZHOU J, CHAN P W, et al. A hybrid method for fine-scale wind field retrieval based on machine learning and data assimilation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4107012.
- [24] 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.
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. (in Chinese)
- [25] 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.
BAI J, TAO Z Y. The pre-processing of doppler radar wind retrieval VAP technique [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, 11(1): 21–26. (in Chinese)
- [26] LIANG X D. An integrating velocity - azimuth process single-Doppler radar wind retrieval method [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(4): 658–665.
- [27] 姚晓娟, 孙鑫, 计燕霞, 等. IVAP 法反演组网雷达风场试验与验证 [J]. *气象*, 2024, 50(11): 1386–1396.
- YAO X J, SUN X, JI Y X, et al. Experiments and verification on doppler radar network wind fields retrieved by the IVAP method [J]. *Meteorological Monthly*, 2024, 50(11): 1386–1396. (in Chinese)
- [28] AUJOL J F, GILBOA G, CHAN T, et al. Structure-texture image decomposition — modeling, algorithms, and parameter selection [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, 67(1): 111–136.
- [29] XU L, YAN Q, XIA Y, et al. Structure extraction from texture via relative total variation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 1–10.
- [30] 张鑫卓. 基于咸阳机场多普勒天气雷达的近地面风场反演算法研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2023.
ZHANG Z X. Research on wind field in version algorithm based on Doppler weather radar of Xianyang airport [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2023. (in Chinese)
- [31] YUAN J L, SU L, XIA H Y, et al. Microburst, windshear, gust front, and vortex detection in mega airport using a single coherent doppler wind lidar [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1626.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 张硕(2003—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。2025年获南京信息工程大学学士学位, 现为该校在读研究生, 主要从事相干多普勒测风激光雷达数据处理算法和应用研究。



通信作者: 袁金龙(1992—), 男, 副教授, 博士, 首批江苏省青年科技人才“U35培育”对象。主要研究方向为激光雷达、航空气象、大气遥感、人工智能交叉应用等。已发表论文30余篇, 授权发明专利20余项, 获金燧奖金奖等奖项。