

低信噪比下相干多普勒激光雷达风场矢量反演算法

赵萌, 郭磐*, 芮训豹, 陈思颖, 张寅超, 陈和

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 为了能在低信噪比情况下获得高精度矢量风速, 采用非线性最优化理论中的序列二次规划(SQP)求解滤波正弦波拟合(FSWF), 实现了速度方位显示(VAD)算法中矢量风场的反演。基于模拟数据进行仿真实验, 以反演结果的均方根误差作为评价指标, 对比直接正弦波拟合(DSWF)和 SQP-FSWF 两种算法, 结果表明在低信噪比条件下 SQP-FSWF 算法的反演效果优于 DSWF 算法。在 FSWF 计算中, 基于风场反演结果的时空连续性, 对比 SQP 算法和无约束最优化算法中的拟牛顿法, 结果表明, SQP 算法在低信噪比下效果更好。开展了激光雷达和探空气球的风场测量对比实验, 获取了真实的激光雷达回波信号和同步探空气球数据, 以进一步评估算法的可靠性。实验结果显示, SQP-FSWF 算法得到的风速反演结果, 同作为对比对象的探空气球的测量结果(水平风速、水平风向), 两者间的相关系数分别为 0.993 和 0.988, 平均误差分别为 0.2 m/s 和 3.28°, 均方根误差分别为 0.28 m/s 和 4.62°。对比分析反演结果的时空连续性发现, 所提出方法在低信噪比下时空连续性更好, 与模拟数据实验结果的效果表现一致。

关键词 遥感; 相干多普勒激光雷达; 速度方位显示; 序列二次规划算法; 信噪比

中图分类号 TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1110005

Wind-Field Vector Retrieval Method at Low Signal-to-Noise Ratio for Coherent Doppler Lidar

Zhao Meng, Guo Pan*, Rui Xunbao, Chen Siying, Zhang Yinchao, Chen He

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In this study, the sequential quadratic programming (SQP) in nonlinear optimization theory is used to solve the filtered sine wave fitting (FSWF). Based on the speed azimuth display (VAD) algorithm, high-precision inversion of the vector wind field is achieved at low signal-to-noise ratio (SNR). In the simulation experiment, the root mean square errors of the inversion results are used as the evaluation index, and the direct sine wave fitting (DSWF) algorithm and the SQP-FSWF algorithm are compared. In the FSWF calculation, based on the spatial-temporal continuity of the wind field inversion results, the SQP algorithm and the quasi-Newton method in the unconstrained optimization algorithm are compared. The comparison results show that the inversion effect of SQP-FSWF is better than those of DSWF and the quasi-Newton method at low SNR. To further evaluate the reliability of the proposed algorithm, we perform the wind field measurement contrast experiments based on lidar and synchronous sounding balloon, in which we obtain the real echo signal of lidar and the wind field data of synchronous sounding balloon. The wind speed inversion results simulated by the SQP-FSWF algorithm and the results measured by synchronous sounding balloon as the comparison object are compared. It can be seen that for horizontal wind speed, the correlation coefficient, the average error, the root mean square error are 0.993, 0.2 m/s, 0.28 m/s; for horizontal wind direction, the correlation coefficient, the average error, the root mean square error are 0.988, 3.28°, 4.62°, respectively. Based on the comparison between the spatial-temporal continuity of the wind retrieval results, the proposed method at low SNR is advantageous, which is consistent with the results of the simulated data.

收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-07-06; 录用日期: 2018-07-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61505009)

* E-mail: guopan@bit.edu.cn

Key words remote sensing; coherent Doppler lidar; velocity azimuth display; sequence quadratic program algorithm; signal-to-noise ratio

OCIS codes 280.3340; 010.3640; 010.0280; 030.1640

1 引 言

大气风场与人类的生活密切相关,在大气动力学、气候学、风能资源利用等研究中起关键作用。相干多普勒激光雷达(CDL)以其高时空分辨率、高精度等优势成为目前大气风场测量的重要技术之一。相干多普勒激光雷达直接测得的是径向风速,需要通过适当的方法将多个径向风速合成得到矢量风速。速度方位显示^[1-2](VAD)算法是在水平风场呈线性分布的假设条件下,利用多普勒测风激光雷达以扫描的方式获取各个径向上的风速信息,通过将各个方向的径向风速信息合成,得到矢量风场的垂直风速、水平风速和水平风向。这项技术被各国学者广为应用,被认为是一种比较有效的矢量风场反演方法。

直接正弦波拟合(DSWF)和滤波正弦波拟合(FSWF)都是基于VAD的反演方法,二者都是通过功率谱数据获取径向风速,然后根据径向风速合成得到三维矢量风速信息^[3]。其中,DSWF算法计算量小、过程简单,是一种简单、有效的矢量风速反演方法,因此得到了广泛的应用^[4-6]。FSWF算法相对DSWF具有更高的计算精度,但是计算过程较复杂^[7]。FSWF算法一般可以通过高斯-牛顿(GN)、Levenber-Marquardt(LM)等非线性最小二乘法求解,但是目前这些非线性最小二乘法在VAD风场反演应用中存在算法收敛速度较慢甚至不收敛等问题,稳定性较差,限制了此方面研究的应用^[5,8]。

本文在当前研究的基础上,应用最优化理论,在FSWF算法的计算过程中,采用非线性最优化算法中的序列二次规划(SQP)代替非线性最小二乘法,以求解矢量风场。使用模拟数据,基于风速反演结果的误差,在不同信噪比(SNR, R_{SN})下对比DSWF算法和基于SQP的FSWF算法(简称SQP-FSWF算法);基于风速反演结果的时空连续性,对比SQP-FSWF算法和基于拟牛顿法的FSWF算法(简称BFGS-FSWF算法)。最后开展了相干多普勒激光雷达和探空气球的联合测风实验,验证了所提方法的有效性,并利用实验数据对模拟实验的结论进行了验证。

2 DSWF 和 FSWF 矢量风速反演原理

2.1 DSWF 矢量风速反演原理

通过VAD法反演矢量风速的示意图如图1所示。激光雷达以俯仰角 φ 、方位角 θ_i ($i=1,2,3,\dots,n$)在圆周上扫描,则风速矢量 $\mathbf{V}=(V_z, V_x, V_y)$ 与径向风速 V_{ri} 之间的关系可以表示为

$$\begin{cases} V_{ri} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}_i \\ \mathbf{S}_i = (\sin \varphi, \cos \varphi \cos \theta_i, \cos \varphi \sin \theta_i) \end{cases} \quad (1)$$

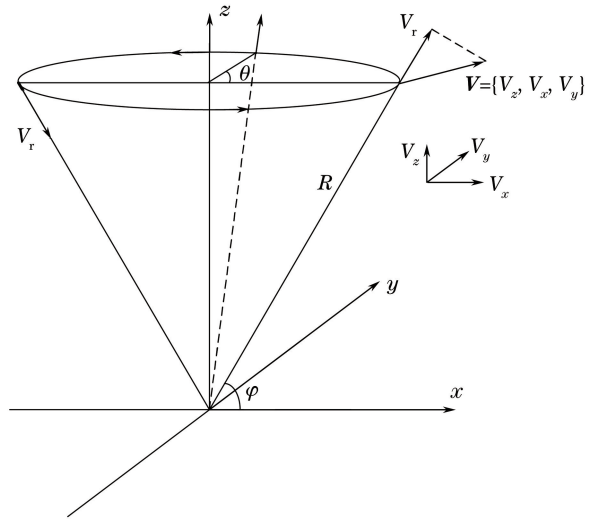


图1 VAD法矢量风速反演原理

Fig. 1 Principle of wind vector retrieval using VAD method

DSWF通过功率谱数据得到径向风速 V_{ri} ,然后进行矢量风速估计。设 \hat{V}_{ri} 是在方位角为 θ_i 时获取到的径向风速估计值,对 n 个方位角进行探测,径向风速分布概率密度函数为^[3]

$$p(\hat{V}_{ri} | \mathbf{V}) = \frac{1 - b_e}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{ri} - \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{V})^2}{2\sigma_g^2}\right] + \frac{b_e}{B_V} \quad (2)$$

式中: σ_g^2 为能够反演到正确径向风速的方差,在低信噪比条件下 σ_g 近似等于多普勒频谱谱宽度^[3,9]; b_e 为反演出错的径向风速所占比例($0 \leq b_e \leq 1$); B_V 为风速带宽。由于在不同方位角探测到的径向风速是独立的,当(2)式中的 b_e 很小($b_e \ll 1$)时,风速矢量 \mathbf{V} 的最大似然估计可以表示为

$$p(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rn} | \mathbf{V}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_g)^n} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_g^2} \sum_{i=1}^n (\hat{V}_{ri} - \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{V})^2\right]. \quad (3)$$

则当(3)式取最大值时有

$$\nabla \sum_{i=1}^n (\hat{V}_{ri} - \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{V})^2 |_{\mathbf{V}=\hat{\mathbf{V}}} = \mathbf{0}. \quad (4)$$

(4)式的解可以表示为

$$\hat{\mathbf{V}} = \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{S}_i \mathbf{S}_i^T\right)^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{V}_{ri} \mathbf{S}_i. \quad (5)$$

通过激光雷达测量各个径向的径向风速和方位角信息,根据(5)式得到相应的矢量风速。由(4)式可以看出,DSWF 求解过程与最小二乘法相同,因此,DSWF 等效于最小二乘法^[10]。

2.2 FSWF 矢量风速反演原理

当采集到的信号信噪比很低且满足 $(1 - b_e) / \sqrt{2\pi}\sigma_g \leq b_e / B_V$ 时,(3)式可以表示为

$$p(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rn} | \mathbf{V}) \approx \left(\frac{b_e}{B_V}\right)^n + \left(\frac{b_e}{B_V}\right)^{n-1} \frac{1 - b_e}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{ri} - \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{V})^2}{2\sigma_g^2}\right]. \quad (6)$$

令

$$Q(\mathbf{V}) = \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{ri} - \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{V})^2}{2\sigma_g^2}\right], \quad (7)$$

当 $Q(\mathbf{V})$ 取最大值时,矢量风速 \mathbf{V} 取得最大似然估计,即

$$\max\{Q(\mathbf{V})\} = Q(\hat{\mathbf{V}}). \quad (8)$$

相对于 DSWF 算法,FSWF 算法滤除了径向风速估计 \hat{V}_{ri} 不在区间 $[|\mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{V}}| - \sigma_g, |\mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{V}}| + \sigma_g]$ 中的错误估计,因此,理论上在低信噪比情况下 FSWF 会比 DSWF 有更好的反演效果。

3 SQF-FSWF 算法求解

3.1 基于最优化理论的模型建立

由 FSWF 算法矢量风速反演原理可知,矢量风速的求解最终转换为对(8)式的求解。由(7)式可以看出, $Q(\mathbf{V})$ 为以 $\mathbf{V} = (V_z, V_x, V_y)$ 为变量的非线性函数,则利用 FSWF 算法反演矢量风速的问题,可以看作非线性函数的最优化求解问题。对其求解可以选择常用的非线性最小二乘法如 GN 和 LM 等,但 GN 最小二乘法稳健性较差,会出现算法不收敛的问题,从而导致收敛速度和精度难以达到应用要

求;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时会出现收敛速度慢甚至不收敛的问题^[5]。根据非线性最优化理论,非线性最优化算法(如共轭梯度法、拟牛顿法等)以其稳定性高、收敛性好得到了较多的应用^[11],但在信号信噪比较低时,采用共轭梯度法、拟牛顿法这些无约束最优化方法进行求解时,最终结果可能收敛在一些不可能出现的风速点,在风速反演结果中的表现是出现奇异点,影响了风速反演结果的时空连续性。

相对于无约束最优化算法,采用约束最优化算法可以通过控制算法的约束条件,对风速范围进行约束,从而避免反演结果出现较大的偏差,理论上可以使风速反演结果具有更好的时空连续性。SQP 是求解非线性约束最优化问题的一种稳定有效的方法,在数值效果和计算稳定性方面较其他方法有着极大的优势,是当前处理中、小规模非线性约束最优化问题最优秀的算法之一^[12]。因此,为了使 FSWF 在低信噪比条件下能更有效地反演风速,本研究尝试选择约束性最优化求解中的 SQP 算法进行求解。

3.2 基于 SQP 算法的模型求解

SQP 方法的基本思想是将原非线性最优化问题处理为一系列近似的二次规划子问题,通过求解子问题得到搜索方向,进行迭代求解。

应用 SQP 算法建立风速反演模型,可将(8)式简化为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{V}) = 1 / \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{ri} - \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{V})^2}{2\sigma_g^2}\right] \\ -a \leq V_z \leq a \\ \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \leq b \end{cases}, \quad (9)$$

式中: a 和 b 分别为垂直风速、水平风速范围。其拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{V}, \lambda) = f(\mathbf{V}) + \sum_{i=1}^3 \lambda_i g_i(\mathbf{V}), \quad (10)$$

式中: $g_1(\mathbf{V}) = V_z - a$ 、 $g_2(\mathbf{V}) = -V_z - a$ 和 $g_3(\mathbf{V}) = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} - b$ 为风速矩阵的边界函数; λ 为拉格朗日算子。

应用 SQP 算法模型进行风速反演求解主要过程如下:

- 1) 给定风速初值 \mathbf{V}_0 , 初始正定矩阵 \mathbf{H}_0 , 迭代精度 ξ , 令 $k=0$ 。
- 2) 求解二次规划子问题得到 \mathbf{d}_k , 即

$$\begin{cases} \min \left[\frac{1}{2} \mathbf{d}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{d}_k \right] + \nabla f(\mathbf{V}_k)^T \mathbf{d}_k \\ \nabla g_i(\mathbf{V}_k)^T \mathbf{d}_k + g_i(\mathbf{V}_k) \leq 0, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (11)$$

3) 若 $\|\mathbf{d}_k\| \leq \xi$, 则 \mathbf{V}_k 为算法取得的最优点; 否则, 采用一维线性搜索, 确定步长 α_k , 令 $\mathbf{V}_{k+1} = \mathbf{V}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k$ 。

4) 采用 BFGS 校正方法更新 \mathbf{H}_k [10]:

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{\mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^T}{\mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k}, \quad (12)$$

其中,

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{V}_{k+1} - \mathbf{V}_k, \quad (13)$$

$$\mathbf{q}_k = \nabla_z L(\mathbf{V}_{k+1}, \lambda_{k+1}) - \nabla_z L(\mathbf{V}_k, \lambda_k). \quad (14)$$

当 $\mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k > 0$ 时, 只要保证初始 \mathbf{H}_k 正定, 就能保证所有后续 \mathbf{H}_{k+1} 正定; 当 $\mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k \leq 0$ 时, 为保证 \mathbf{H}_{k+1} 的正定性, 需要对 BFGS 公式进行修正, 采用 Powell 提出的截断 BFGS 修正 [12-13], 即

$$\mathbf{q}_k = \begin{cases} \mathbf{q}_k, \mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k \geq 0.2 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \\ \theta_k \mathbf{q}_k + (1 - \theta_k) \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k, \mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k < 0.2 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \end{cases}, \quad (15)$$

$$\theta_k = \frac{0.8 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k - \mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k}. \quad (16)$$

5) 令 $k = k + 1$, 继续求解二次规划子问题。本研究中初始正定矩阵 \mathbf{H}_0 为单位矩阵, 迭代精

度为 10^{-6} 。为避免迭代次数过多, 陷入低效循环, 设置最大迭代次数为 400, 超过最大迭代次数则重新初始化进行计算。在实际进行风场实时探测时, 风场信息是未知的, 无法获得具体某一时刻、某一高度的风速信息, 很难给出有效的初值参考, 因此选择矢量风场 $\mathbf{V}_0 = (0, 0, 0)$ 作为算法的初值。在高度 3 km 以下, 水平风速一般都在 30 m/s 以下 [14-15], 因此给定水平风速上限 30 m/s; 而对于垂直风速, 一般没有较大风切变时, 垂直风速一般都在 1 m/s 以内 [14-15], 考虑算法的普适性, 给定垂直风速上限 5 m/s。

4 模拟及实验数据对比验证

4.1 模拟数据验证

给定一组矢量风速作为当前的矢量风场信息, 根据激光雷达的扫描数据, 生成在各个方位角上的径向风速, 如图 2 中绿线所示; 根据给定的信噪比, 以及各个方位角上的径向风速, 生成在各个方位角上的模拟回波信号。对模拟信号采用周期图法进行功率谱估计, 获取在各个方位角上的径向风速估计, 如图 2 中红色“*”点所示。根据各个方位角上的径向风速估计, 分别使用 DSWF 方法和 SQP-FSWF 方法进行矢量风速估计, 将矢量风速估计再分解到各个方位角, 得到对应的径向风速, 如图 2 中蓝色曲线所示。

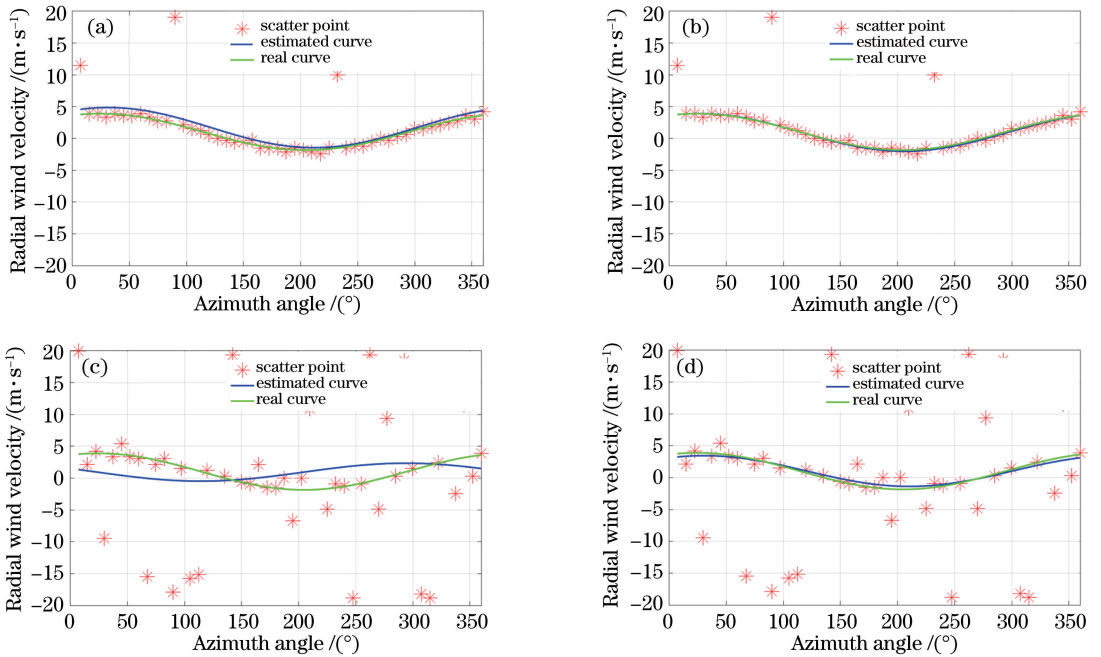


图 2 不同信噪比下基于模拟数据的两种算法对比。(a) $R_{SN} = -10$ dB, DSWF; (b) $R_{SN} = -10$ dB, FSWF; (c) $R_{SN} = -20$ dB, DSWF; (d) $R_{SN} = -20$ dB, FSWF

Fig. 2 Comparison of two algorithms at different R_{SN} based on simulated data.

(a) $R_{SN} = -10$ dB, DSWF; (b) $R_{SN} = -10$ dB, FSWF; (c) $R_{SN} = -20$ dB, DSWF; (d) $R_{SN} = -20$ dB, FSWF

对比图 2(a)、(b)可以看出,当信噪比为 -10 dB时,DSWF 和 FSWF 均取得了理想的反演结果;而由图 2(c)、(d)可知,当信噪比为 -20 dB时,DSWF 的反演结果出现了一定的偏差,FSWF 仍然有比较好的反演效果。DSWF 在低信噪比情况下拟合效果不理想,这是因为 DSWF 对径向风速估计没有“筛选”作用,错误的径向风速估计与正确的径向风速估计对矢量风速反演结果影响程度一样。当错误径向风速占比较大时,矢量风速估计与真实矢量风速差别很大,导致矢量风速估计投影在各个方位角的径向风速与真实矢量风速投影的径向风速差别很大。而 FSWF 对各个方位角上的径向风速进行了一定的“筛选”,错误的径向风速在矢量风速估计中的权重相对较小,因此即使在低信噪比情况下,FSWF 也能得到更加准确

的矢量风速估计。

为进一步比较不同信噪比下两种算法的反演效果,利用模拟数据进行数值实验。在每个信噪比下生成 100 组模拟回波信号,对每一组模拟回波信号,分别采用 DSWF 和 SQP-FSWF 两种算法进行矢量风速合成计算。利用每个信噪比下所得的矢量风速计算结果和给定模拟风场的矢量风速进行误差分析,计算每个信噪比下两种风速反演算法的均方根误差。图 3 给出了不同信噪比下两种算法风场反演结果的误差曲线。对比图 3(a)、(b)可以看出,在信噪比高于 -16 dB 时,两种算法的风速和风向均方根误差基本一致,均维持在较低的水平;而随着信噪比的继续降低,两种算法的风速和风向均方根误差都开始增大,且 DSWF 较 FSWF 增长速度更快,在相同信噪比下,FSWF 的误差低于 DSWF。

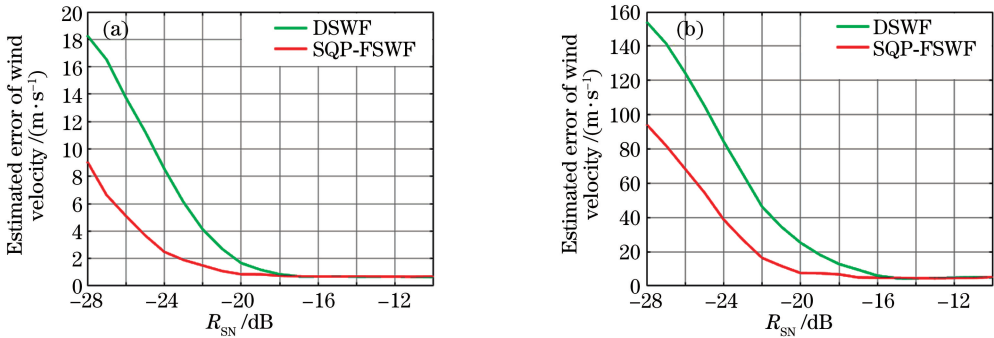


图 3 不同信噪比下基于模拟数据的两种算法风场反演误差对比。(a)风速;(b)风向

Fig. 3 Comparison of wind-field estimated retrieval errors between the two algorithms based on simulated data at different R_{SN} . (a) Wind velocity; (b) wind direction

在使用 FSWF 进行矢量风速反演的过程中,可以使用 SQP 算法、拟牛顿法和共轭梯度法等无约束最优化算法进行计算求解。为了对比这几种算法在不同信噪比下的效果,采用 FSWF 算法对模拟数据进行矢量风速合成计算,在计算过程中分别采用 SQP 算法和无约束最优化算法中收敛性和稳定性较好的拟牛顿法^[12],基于风速反演结果的时空连续性对算法效果进行比较。其中,在生成模拟回波信号的过程中,为了模拟实际风场的变化,给定模拟风场的垂直风速、水平风速和风向分别在 $0.3 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$ 、 $10 \text{ m/s} \pm 3 \text{ m/s}$ 和 $320^\circ \pm 20^\circ$ 内随机波动。在 SQP 算法中给定对应于原始风场风速上下限的约束条件。图 4 给出了不同信噪比下,使用 SQP 和拟牛顿法时的风场反演时空图。对比图 4(a)、(b)和(c)可以看出,在信噪比较高时,拟牛顿法和 SQP 都可以得到稳定的反演结果,且均与给定的模拟风场较为一致;而随着信噪比的降低,使用拟牛顿法所

得的垂直风速、水平风速、水平风向结果均出现了较大的波动,且与给定的模拟风场产生了较大的偏差;而使用 SQP 算法所得结果稳定性更好,且偏差更小。这是由于随着信噪比的降低,拟牛顿法的部分求解结果收敛到模拟时给定的风场范围外;而 SQP 算法由于对风速范围进行了约束,所得结果只收敛在模拟时给定的风场范围内,因此所得结果的波动更小,且得到正确风速结果的概率更高。

4.2 对比实验设计和实验系统介绍

为了验证激光雷达系统的探测能力,验证 SQP-FSWF 方法的可靠性及其在低信噪比下的反演效果,在北京市南郊气象局开展了相干多普勒激光雷达与气象局探空气球的联合测风实验。其中探空气球搭载 GFE(L)-1 型二次测风雷达和 GTS1 型电子探空仪,是我国近年来气象业务中广泛运用的一种新一代高空探测系统,可探测从地面至 30000 m 高空的风向、风速、气温、气压、湿度等气象要素,具有

探测精度高、采样速率快、使用方便等特点,其风速精度为 1 m/s(风速 10 m/s 以下)、风速的 10%(风速 10 m/s 以上);风向精度为 5°(风速 25 m/s 以下)、10°(风速 25 m/s 以上)。实验中采用的相干多普勒激光雷达系统为北京理工大学激光雷达实验室自行研制的便携式相干多普勒测风激光雷达。图 5(a)给出了该激光雷达的实物图。该系统采用

全光纤结构,以光纤环形器作为光收发开关;望远镜采用收发同轴结构,并通过楔形镜实现光束的偏转。光电探测部分采用平衡探测器对回波光信号和本振激光信号进行拍频,并将其转换的电信号输入至 14 位高速采集卡进行模数转换,通过现场可编程门阵列(FPGA)数字信号处理器对数据进行实时处理,可以实现风速的实时显示。

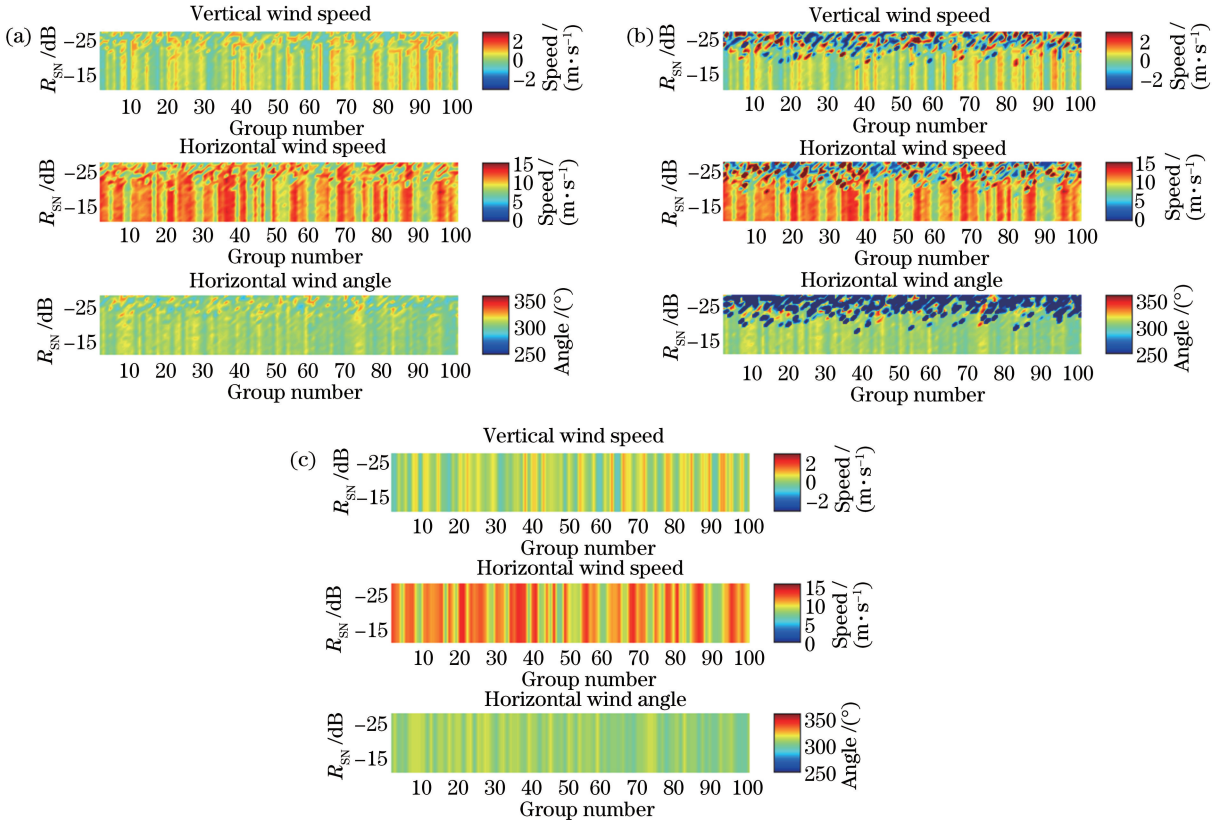


图 4 不同信噪比下基于模拟数据的 SQP 和拟牛顿法风场数据反演对比。
(a)采用 SQP 法的风场反演;(b)采用拟牛顿法的风场反演;(c)原始风场反演

Fig. 4 Comparison of wind-field estimated retrieval errors between SQP and quasi-Newton methods based on simulated data at different R_{SN} . (a) Retrieval data with SQP; (b) retrieval data with quasi-Newton method; (c) retrieval data of original wind-filed

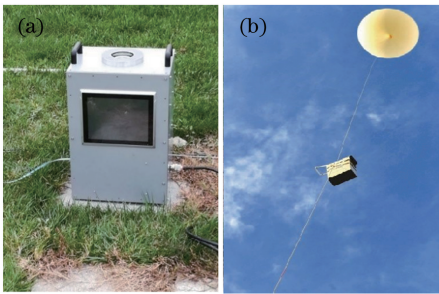


图 5 便携式相干测风激光雷达和探空气球实物图。
(a)便携式相干测风激光雷达;(b)探空气球

Fig. 5 Physical photos of the portable coherent Doppler lidar and sounding balloon. (a) Portable coherent Doppler lidar; (b) sounding balloon

气象局每天定时放出探空气球。相干多普勒测风激光雷达系统距离气球释放点约 100 m,在探空气球释放的前后进行连续测风实验。实验中,激光雷达系统采用的扫描步进角为 45°,扫描固定的 8 个径向分别采用 DSWF 和 FSWF 算法进行矢量风速合成,每 8 个径向进行一次合成,反演结果作为当前测量时刻的矢量风速。系统相关参数指标如表 1 所示。

4.3 探空气球和激光雷达系统对比实验结果

2018 年 3 月 20 日至 3 月 23 日,连续进行了 4 次探空气球数据和多普勒激光雷达的对比观测实验。图 6~9 给出了水平风速和水平风向的对比实验结果。图中 CDL-FSWF 代表 FSWF 算法反演得到的风场数据,CDL-DSWF 代表 DSWF 算法反演

表 1 相干测风多普勒激光雷达系统参数指标
Table 1 Parameters of the coherent wind-detected Doppler lidar system

Parameter	Value
Wavelength /nm	1550
Pulse repetition frequency /kHz	10
Pulse energy / μ J	19
Pulse width /ns	400
Sampling rate /MHz	400
Pitch angle /($^{\circ}$)	70
Pulse accumulation number	10000
Spatial resolution /m	88
Measurement range /m	130-1200
Telescope diameter /mm	50
Weight /kg	24
Outline dimension /cm ³	35 \times 27.5 \times 50

得到的风场数据,其中,FSWF 计算过程中采用 SQP 算法。balloon 代表探空气球得到的风场数据。

从图 6~9 中可以看出,在高度较低时,回波信号信噪比较高,DSWF 算法和 FSWF 算法的风场反演结果基本相同,均和探空气球的结果高度一致。如图 7 所示,当信噪比始终高于 -19 dB 时,DSWF 算法和 FSWF 算法的结果几乎完全一致并且都和探空气球的结果保持高度一致。而随着探测高度的增加,回波信号的信噪比逐渐降低,当信噪比低于 -19 dB 时,DSWF 算法的反演结果开始产生较大的浮动,和探空气球的风场数据产生一定的偏差,而 FSWF 算法的结果直到信噪比达到 -21 dB 时仍然和探空气球保持高度一致。

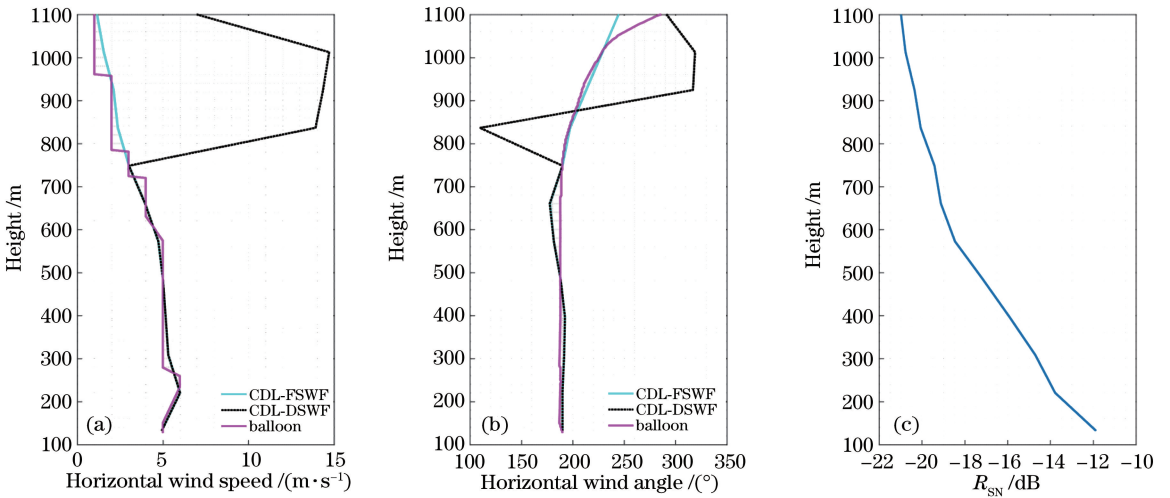


图 6 2018 年 3 月 20 日相干多普勒激光雷达与探空气球对比。(a)水平风速;(b)水平风向;(c)信噪比

Fig. 6 Comparison of coherent Doppler lidar and sounding balloon on March 20, 2018.

(a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction; (c) R_{SN}

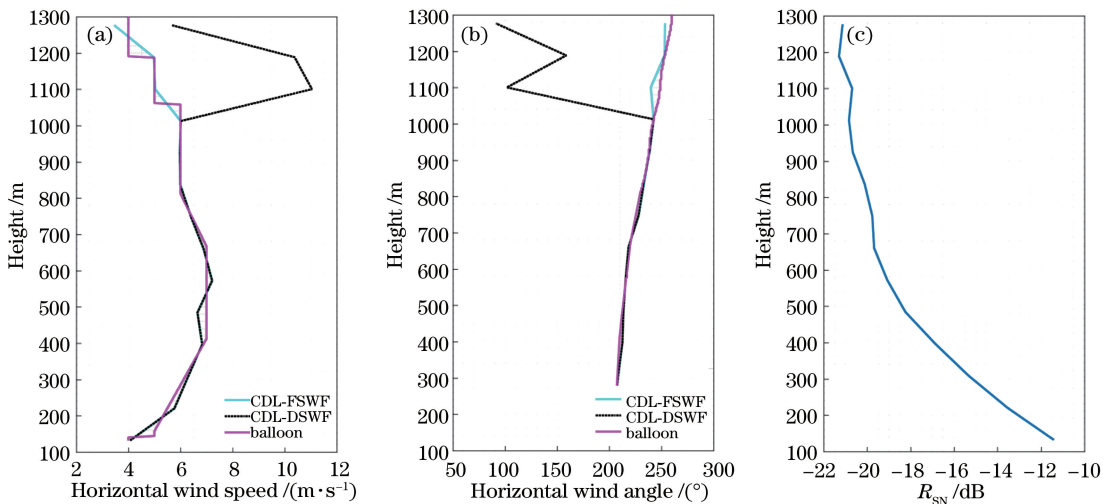


图 7 2018 年 3 月 21 日相干多普勒激光雷达与探空气球对比。(a)水平风速;(b)水平风向;(c)信噪比

Fig. 7 Comparison of coherent Doppler lidar and sounding balloon on March 21, 2018.

(a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction; (c) R_{SN}

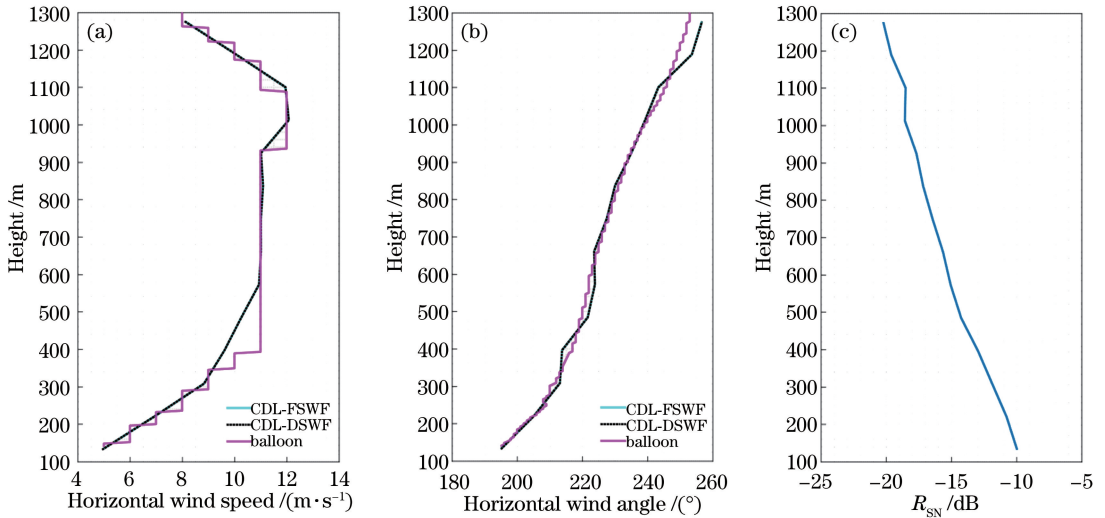


图 8 2018 年 3 月 22 日相干多普勒激光雷达与探空气球对比。(a)水平风速;(b)水平风向;(c)信噪比

Fig. 8 Comparison of coherent Doppler lidar and sounding balloon on March 22, 2018.

(a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction; (c) R_{SN}

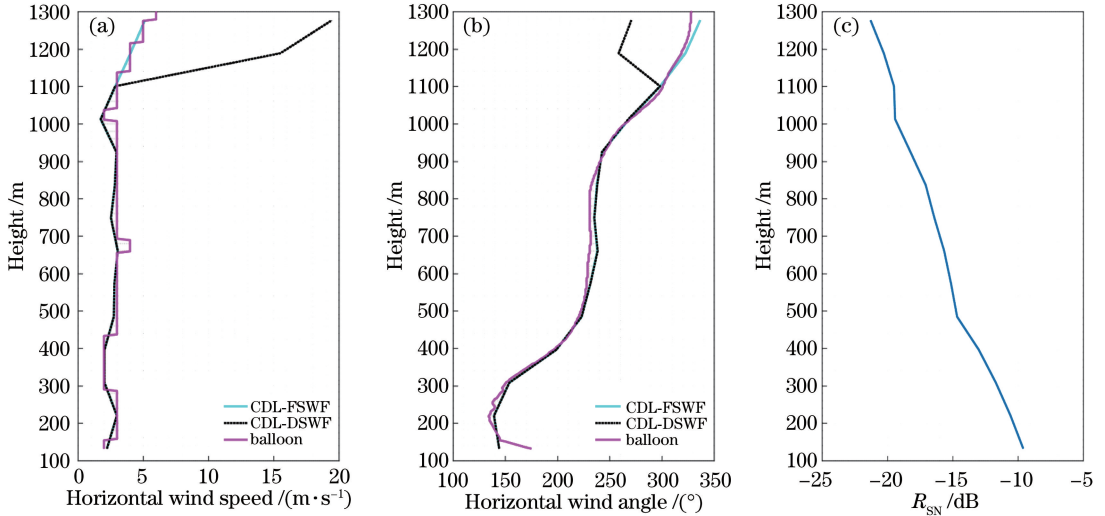


图 9 2018 年 3 月 23 日相干多普勒激光雷达与探空气球对比。(a)水平风速;(b)水平风向;(c)信噪比

Fig. 9 Comparison of coherent Doppler lidar and sounding balloon on March 23, 2018.

(a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction; (c) R_{SN}

图 10 给出了 FSWF 反演结果和探空气球的散点图对比。对连续 4 d 的实验结果进行统计,得到 FSWF 反演结果和探空气球的水平风速、水平风向相关系数分别为 0.993 和 0.988,平均误差分别为 0.2 m/s 和 3.28°,均方根误差分别为 0.28 m/s 和 4.62°。

4.4 SQP 算法和拟牛顿算法对比

采用 FSWF 算法对激光雷达系统连续 1000 组的径向风速测量结果进行矢量风速合成,计算过程中分别采用 SQP 法和拟牛顿法。图 11 给出了采用拟牛顿法所得的反演结果时空图。从图中可以看出,在 1000 m 高度以下,所得矢量风速具有很好的连续性。而随着高度增加,由于回波信号信噪比逐

渐降低,径向风速的错误估计增多。在高度高于 1000 m 时,矢量风速反演结果出现大量奇异点,相比于高度在 1000 m 以下的风速反演结果,其在时间轴和高度层上连续性较差,不能再有效地反映风场信息。

图 12 给出了采用 SQP 算法所得的反演结果时空图。为了能在低信噪比时获得更好的矢量风速反演结果,在采用 SQP 算法进行计算时,对原有的风速范围进行了进一步约束,在 300 m 高度以上由于受地面影响较小,相邻高度层间矢量风速相差不大^[14-15]。在 1000 m 以上的高度层进行矢量风速合成时,以 1000 m 处高度层的风场反演结果为基准,

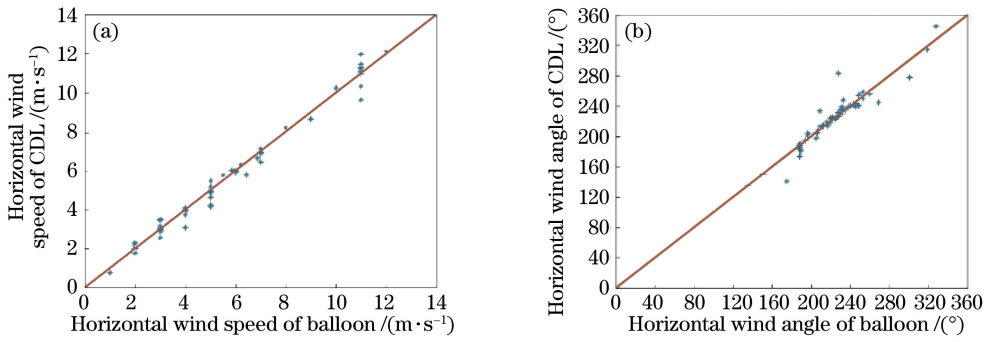


图 10 相干多普勒激光雷达和探空气球散点图对比。(a)水平风向;(b)水平风速
Fig. 10 Comparison of the scatterplot of coherent Doppler lidar and sounding balloon.

(a) Horizontal wind speed; (b) horizontal wind direction

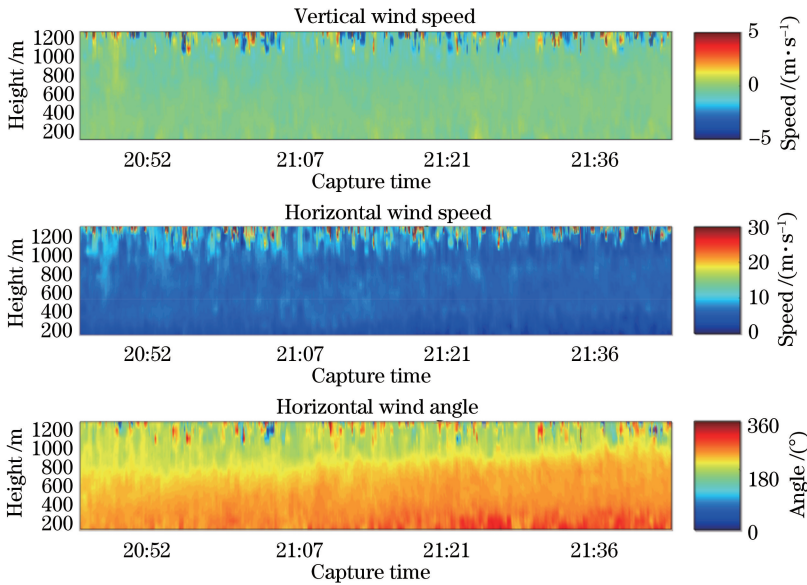


图 11 采用拟牛顿法的 FSFW 矢量风速反演时空图

Fig. 11 Spatiotemporal figures of wind vector retrieval with FSFW using quasi-Newton method

在垂直风分量上约束±2 m/s,水平风分量分别约束±5 m/s。对比图 11 和图 12 可以看出,在 1000 m 高度以下,采用两种算法所得的反演结果具有较高的一致性,都有很好的连续性,没有奇异点出现;而在 1000 m 高度以上,相比于拟牛顿法所得结果,采用约束性最优化 SQP 算法所得矢量风速反演结果的奇异点明显减少,在时间轴和不同高度层上的连续性也有明显改善。

5 结 论

在硬件配置一定的条件下,相干多普勒测风激光雷达系统的探测能力取决于信号处理算法。一般情况下,回波信噪比随探测高度的升高逐渐降低,因此系统的有效探测高度取决于算法在低信噪比区域的性能表现。为了提高矢量风速的有效探测高度,提出并使用基于约束性非线性最优化理论中 SQP

算法的 FSFW 进行矢量风场反演。

通过模拟实验以及激光雷达与探空气球联合测风对比实验可以看出,在高信噪比条件下,DSWF 算法和 SQP-FSFW 算法都能实现矢量风速的有效反演;在低信噪比条件下,DSWF 算法反演结果会出现较大的波动,不能实现准确的反演,而 SQP-FSFW 算法由于对错误风速有一定的筛选作用,仍然能实现较为有效的反演,即在低信噪比条件下, SQP-FSFW 算法优于 DSWF 算法。因此,在测风激光雷达系统风速反演中采用 SQP-FSFW 算法可以有效提高系统的有效反演高度。同时,在使用 FSFW 算法进行矢量风速反演时,分别采用了拟牛顿法和 SQP 算法进行求解。对比其结果可以看出,相对于无约束性最优化算法拟牛顿法, SQP 算法由于可以对风速范围进行限制,避免了风速收敛在不可能出现的风速点上,因此在低信噪比下可以得到

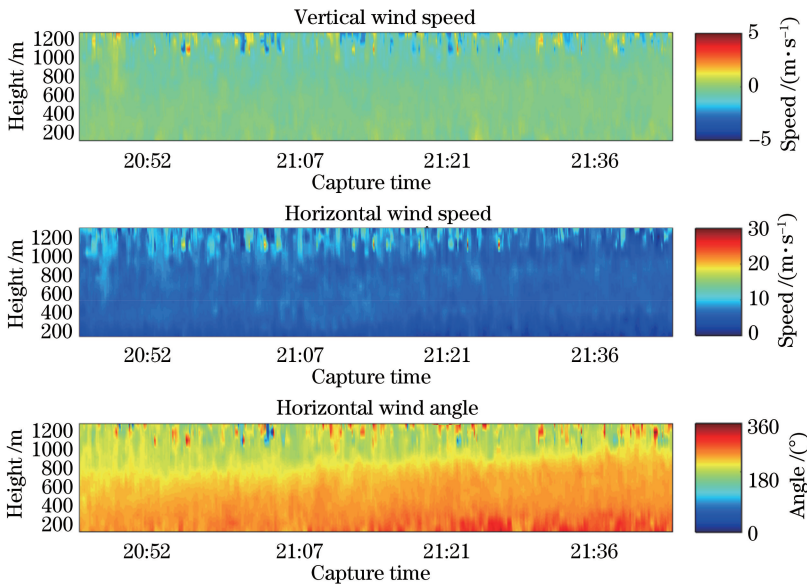


图 12 采用 SQP 的 FSWF 矢量风速反演时空图

Fig. 12 Spatiotemporal figures of wind vector retrieval with FSWF using SQP method

更为可靠的风速反演结果,使风速反演具有更好的时空连续性。该求解方法也可为其他需要进行非线性最优化求解的风场反演提供参考。

对联合测风实验的实验结果进行统计,得到 SQP-FSWF 算法的反演结果和对探空气球的测量结果(水平风速、水平风向)间的相关系数分别为 0.993 和 0.988,平均误差分别为 0.2 m/s 和 3.28°,均方根误差分别为 0.28 m/s 和 4.62°。对比实验结果验证了在 FSWF 计算中 SQP 算法求解的准确性和适用性。

参 考 文 献

[1] Hawley J G, Targ R, Henderson S W, *et al.* Coherent launch-site atmospheric wind sounder: theory and experiment[J]. *Applied Optics*, 1993, 32 (24): 4557-4568.

[2] Werner C. Fast sector scan and pattern recognition for a CW laser Doppler anemometer [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(21): 3557-3564.

[3] Smalikho I. Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(2): 276-291.

[4] 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.

[5] 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, 41.

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, 41.

[6] Fan Q, Zhu K Y, Zheng J F, *et al.* Detection performance analysis of all-fiber coherent wind lidar under different weather types[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0210003.

范琪,朱克云,郑佳锋,等.不同天气类型下全光纤相干激光测风雷达探测性能分析[J].*中国激光*, 2017, 44(2): 0210003.

[7] Banakh V A, Smalikho I N, Falits A V, *et al.* Joint radiosonde and Doppler lidar measurements of wind in the atmospheric boundary layer[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, 28(2): 185-191.

[8] 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.

[9] Frehlich R G, Yadlowsky M J. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(5): 1217-1230.

[10] Banakh V, Smalikho I. Coherent Doppler wind lidars in a turbulent atmosphere [M]. Massachusetts:

- Artech House, 2013: 93-103.
- [11] Yuan Y X, Sun W Y. Optimization theory and methods [M]. Beijing: Science Press, 1997: 528-536.
袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 528-536.
- [12] Wang Y J, Xiu N H. Nonlinear programming theory and methods [M]. Xi' an: Shaanxi Science And Technology Press, 2008: 197-210.
王宜举, 修乃华. 非线性规划理论与算法[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2008: 197-210.
- [13] Powell M J D. The convergence of variable metric methods for non-linearly constrained optimization calculations[C] // Proceedings of the Special Interest Group on Mathematical Programming Symposium, July 11-13, 1977, Madison. [S.n.: s.l.], 1978: 27-63.
- [14] Yu H M, Ren G Y, Liu Y L. The characteristics of wind speed variation at different altitudes of boundary layer in Heilongjiang province[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(10): 1718-1730.
于宏敏, 任国玉, 刘玉莲. 黑龙江省大气边界层不同高度风速变化[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1718-1730.
- [15] Liu C, Che D S, Ke Z J. Application of wind profile radar in upper wind analysis [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013, 7(2): 56-60.
刘成, 车达升, 柯宗建. 风廓线雷达在高空风场分析中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(2): 56-60.