

文章编号: 1001-3806(2008)06-0584-03

激光雷达光束扫描及改进型 VAD 反演方法的仿真

来 栋¹, 陈 涌², 周鼎富², 侯天晋², 周 昕^{1*}

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了弥补激光测风雷达风场反演速度方位显示法的不足, 提高反演风速精度, 提出了一种改进的方法。运用迭代预处理的方法提高原始雷达数据质量, 消除小幅值风速和奇异点的影响, 用统计求和平均的方法反演出 3 维风场; 并建立了风场模型, 通过数值计算软件进行了仿真和误差分析。结果表明, 改进的方法反演出风速的误差不超过 0.5 m/s , 比传统速度方位显示算法的精度提高了 1 倍。

关键词: 激光技术; 风场反演; 速度方位显示法; 测风

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Beam scanning of lidar and the simulation of the improved VAD inversion methods

LAI Dong¹, CHEN Yong², ZHOU Ding-fu², HOU Tian-jin², ZHOU Xin¹

(1. Department of Optoelectronics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract In order to remedy the shortage of the lidar velocity azimuth display (VAD) method and improve the precision of the inversion wind velocity, a new technique was put forward with iterative pretreatment to eliminate low and oddity wind velocity and with the summation average statistical method to obtain three-dimensional wind field. The wind field model was built and then the simulation and error analysis were carried out. The results show that the absolute error of inversion wind field is within 0.5 m/s only one half of that of traditional velocity azimuth display method.

Key words laser technique; inversion wind field; velocity azimuth display methods; anemology

引 言

激光测风雷达是利用大气中随风飘移的微小颗粒(气溶胶或者大气分子)对激光散射回波的多普勒频移效应, 来测量大气风场结构分布的一种现代光电技术。其主要特点是采用光学方法对测量空域的风场进行非接触式实时 3 维测量, 在军事和民用上都有广泛的用途。对风场 3 维测量时, 测风雷达的扫描器在伺服控制下, 使激光扫描探测区域空间中的气溶胶, 然后, 通过气溶胶运动产生的多普勒频移来确定激光束视线方向上的大气风场的径向风速的序列^[1-8]。而激光雷达的一个重要研究内容, 就是利用这些径向风速的序列来反演观测视场的大气风场分布。

上世纪 60 年代, 有学者提出了速度方位显示 (velocity azimuth display, VAD) 反演法。该方法以一个恒定的仰角作全方位锥形扫描, 探测激光散射回波信号, 并由此得到一定高度层的径向风速的序列; 然后将该

序列径向风速拟合为以方位角作为变量的正弦函数, 其最佳拟合点的振幅就是水平风速, 而该点对应的方位角就是水平风向。通过变换探测距离和仰角, 然后锥形扫描其它高度层, 就可以获得不同高度层上的水平平均风速和风向。该方法可以得到测量空域各高度层上的平均风向、水平风速和平均散度等, 但还存在一些不足: (1) 无法获得风速的垂直分量; (2) 在风速幅值小时, 精度差。在径向风速的序列中, 由于各种原因会出现非常小的风速, 大量的小幅值风速会严重降低反演精度; (3) 受到奇异点的影响严重。比如飞鸟或者由于系统的不稳定造成的测量点幅值偏大或偏小, 导致反演精度明显下降; (4) VAD 法仅仅寻找最佳拟合振幅的风速 (即每圈扫描中幅值最大的点), 而并不太关心其它点, 所以, 反演精度会非常依赖于最大幅值点的波动。

针对以上问题, 结合目前正在研制的激光测风雷达系统, 作者提出一种改进的方法。首先运用迭代预处理的方法来提高原始雷达数据质量, 消除小幅值风速和奇异点的影响, 然后用统计求和平均的方法反演出 3 维风场。为了验证可靠性, 首先建立风场模型, 然后采用改进的方法对风场进行反演, 并同时设定模型中的风速进行对比及误差分析, 结果表明, 反演风速的

作者简介: 来 栋 (1982-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光雷达、激光器件以及光通讯方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhoxin@21cn.com

收稿日期: 2007-09-28 收到修改稿日期: 2008-03-25

精度和整个运算效率都得到提高。

1 建立风场模型

激光光束圆锥扫描如图 1 所示, O_{xyz} 为激光束视

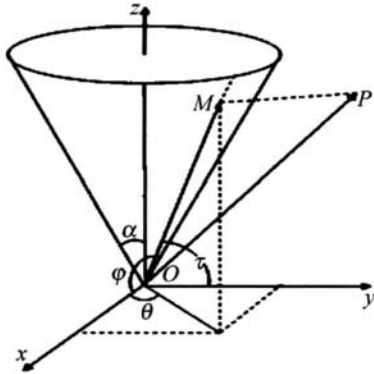


Fig 1 Schematic illustration of the geometry of the conically scanning lidar 线方向速度矢量坐标系, 其中, α 为圆锥半锥角, θ 为扫描角。假设任意风速 $v = (v_x, v_y, v_z)$ 所对应的点为 P , 当激光光束扫描角为 θ 时, v 在激光束视线方向的矢量分量为 $\vec{v}_d = OM$ 。圆锥曲面的解析方程可以表示为:

$$\frac{x}{\cos\varphi} = \frac{y}{\cos\tau} = \frac{z}{\cos\alpha} \quad (1)$$

式中, φ, τ, α 分别为 OM 与坐标轴 x, y, z 的夹角。于是可以通过解析几何知识得到:

$$|\vec{v}_d| = \sqrt{|OP|^2 - |PM|^2} =$$

$$\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 - \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ v_x & v_y & v_z \\ \cos\varphi & \cos\tau & \cos\alpha \end{vmatrix}}{\sqrt{\cos^2\varphi + \cos^2\tau + \cos^2\alpha}}} \quad (2)$$

又有 φ, τ 与 α, θ 的关系:

$$\cos\varphi = \sin\alpha \cos\theta \quad (3)$$

$$\cos\tau = \sin\alpha \sin\theta \quad (4)$$

于是就可以得到 \vec{v}_d 关于圆锥扫描角 θ 的方程:

$$\vec{v}_d = v_z \sin\alpha + v_x \cos\alpha \cos\theta + v_y \cos\alpha \sin\theta \quad (5)$$

由于现用的激光测风雷达系统采用了零偏频技术, 所获得的径向风速序列没有正负之分, 故测得的径向分序

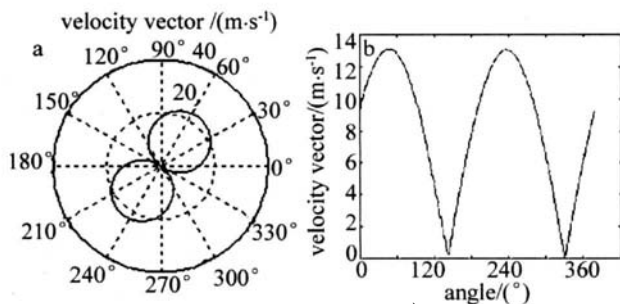


Fig 2 Velocity vector v_d

a- in polar coordinate b- in right angle coordinate

列值 $\vec{v}_d = |\vec{v}_d|$, 其在以 θ 为偏角的极坐标下的轨迹为如图 2a 所示的“8”字形, 该“8”字两端头方向代表该测量层的风向; 而 $|\vec{v}_d|$ 在以 θ 为横坐标下轨迹如图 2b 所示。

2 风场反演算法

在 O_{xyz} 激光束视线方向速度矢量坐标系中, \vec{v}_d 的 3 个独立分量 v_x, v_y, v_z 都可以表示为关于 θ 的正弦函数^[5], 因此, 按照统计平均的方法把每个独立分量的所有点分别求和平均就可以得到反演后的风速 $\vec{v}_d' = (v_x', v_y', v_z')$ ^[5-9-10]。其中:

$$\begin{cases} v_x' = \frac{1}{\cos\varphi} \frac{2}{N} \sum_i (v_{di} \cos\theta) \\ v_y' = \frac{1}{\cos\varphi} \frac{2}{N} \sum_i (v_{di} \sin\theta) \\ v_z' = \frac{1}{\sin\varphi} \frac{1}{N} \sum_i v_{di} \end{cases} \quad (6)$$

式中, N 为整个等距离圈层的采样点数, v_{di} 为每个采样点的径向速度值。该方法统计每圈层中的所有点, 避免受单个点的严重影响; 同时可以直接获得风速的 3 维分量。但是由于小幅度风速和奇异点的存在, 还需要采用迭代的方法对激光束视线方向上的径向风速的序列(原始雷达信号)进行预处理, 提高数据质量。因此, 定义某一高度层整圈层上径向风速的序列数据的速度方差为:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{N=3}^N [v_{di}(\theta) - v_{di}'(\theta)]^2 \quad (7)$$

式中, v_{di}' 为原始雷达信号经过初步反演分析后, 得到的在方位角 θ_i 处的径向速度。 s 反映 v_{di}' 数据的质量 (s 越小, v_{di}' 数据越佳)。

可以设定某一阈值 s_{min} , 当速度方差 $s < s_{min}$ 时, 迭代循环结束, 此时 v_{di}' 数据质量满足系统要求。在迭代过程中, 对奇异点进行修正。凡是速度值满足 $\Delta v = |v_{di} - v_{di}'|$ 大于某个阈值(如 0.1 m/s) 的点认为是奇异点。对奇异点的处理没有采用直接去除的传统方法, 而是令 $v_{di}' = |v_{di} + v_{di}'| / 2$ 。最后把经过该预处理后的 v_{di}' 数据代入 (6) 式即可得到该高度层的平均风速。

3 数值仿真

利用上述建模方法, 用 MATLAB 软件进行了数值仿真。首先假设风速 $v = (v_x, v_y, v_z) = (10 \text{ m/s}, 10 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s})$, 得到整个等距离圈层的径向风速 \vec{v}_d 理论值, 见图 2 随后加入随机噪声和随机奇异点来仿真原始雷达数据, 见图 3 图 4 中的实线为连接经过算法处理后的雷达数据的曲线, 可以看出已经消除掉所有奇异点, 而且每个原始数据点被修正得很好。

把经过预处理后的雷达数据直接代入 (6) 式, 就可

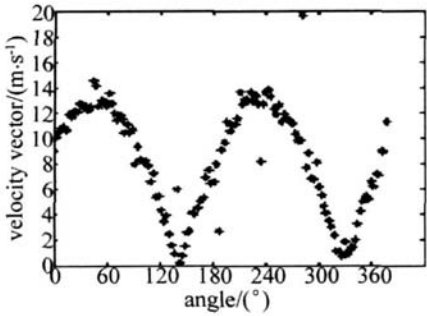


Fig. 3 Original lidar data

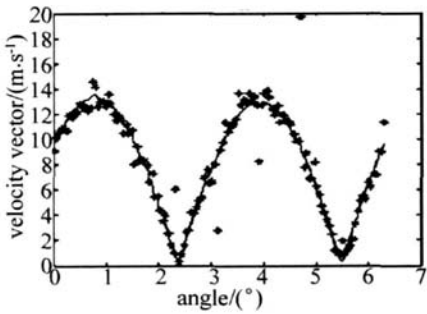


Fig. 4 Lidar data after algorithm processing

以反演出风速 $\vec{v}_d' = (v_x', v_y', v_z') = (10.20\text{m/s}, 9.93\text{m/s}, 0.08\text{m/s})$ 。与理论风速 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = (10\text{m/s}, 10\text{m/s}, 0.1\text{m/s})$ 基本相符。

若水平风 $0.1\text{m/s} \sim 10\text{m/s}$ 方位角从 $0^\circ \sim 360^\circ$, 分析反演风速的绝对误差: $v_a = \left| \sqrt{v_x'^2 + v_y'^2} - \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \right|$ 。结果如图 5 所示。反演出风速的绝对误差均不超过

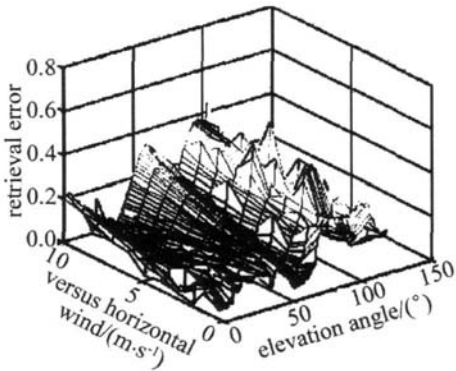


Fig 5 Retrieval error v_a versus horizontal wind and elevation angle θ

0.5m/s 而传统 VAD 算法反演出风速的绝对误差不得超过 1m/s (相对误差不超过 10%)^[11], 相比之下, 有很大的改进。

利用信号发生器所产生的变频信号来模拟雷达原

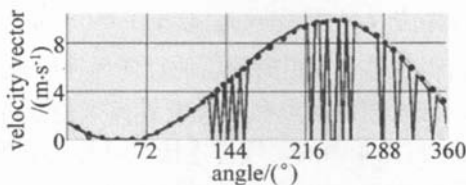


Fig 6 Comparison of front and after to modify

始信号, 在西南技术物理研究所自主开发的应用软件上应用该风场反演算法, 取得了很好的效果。如图 6 所示, 图中实线代表雷达原始信号 (有较多的幅值接近 0 的奇异点), “·” 线为经过算法处理后的拟合曲线, 可以看出已经完全消除奇异点。

4 结论

在激光测风雷达大气风场反演方法中 VAD 算法存在一些固有缺陷, 作者针对这些缺陷提出改进的方法: 运用迭代预处理的方法提高原始雷达数据质量, 消除小幅值风速和奇异点的影响, 然后用统计求和平均的方法反演出 3 维风场。为了进行误差分析, 首先用解析几何的方法仿真出激光雷达对风场做圆锥扫描所测得的激光光束视线方向风速数据 (即雷达原始数据), 然后用改进的反演算法进行数值模拟, 最终获得了 3 维风场结构。风场反演误差精度不超过 0.5m/s 比传统 VAD 算法的精度提高了 1 倍。

参考文献

- [1] HU H W, HU Q Q. The scanning and inversion method of atmosphere wind by Doppler lidar [J]. Applied Laser 2000, 20(5): 213-215 (in Chinese).
- [2] WANG X Q, DONG Y Q, YUAN Sh *et al*. Study on simulation of mirror-Doppler effect in lidar [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 117-119 (in Chinese).
- [3] LAWRENCE E M, SPELLER K, YU D L. Laser Doppler vibrometry for optical MEMS [J]. SPIE, 2002 4827: 80-81.
- [4] NEWSON R K, LINGON D, CAIHOUN R, *et al*. Retrieval of microscale wind and temperature fields from single and dual Doppler lidar data [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(9): 1324-1345.
- [5] ROTHERMEL J OLIVER L D, BANTA R M, *et al*. Remote sensing of multi-level wind fields with high-energy airborne scanning coherent Doppler lidar [J]. Optics Express 1998 2(2): 40-50.
- [6] HU H W, HU Q Q. The beam scanning and inversion method for detecting wind by lidar [J]. High Power Laser and Particle Beams 2001, 13(1): 24-26 (in Chinese).
- [7] HAWLEY J G, TARG R, HENDERSON S W, *et al*. Coherent lunch-site atmospheric wind sounder theory and experiment [J]. Appl Opt 1993 32(24): 4557-4568.
- [8] THOMAS M, SRIVASTAVA R C. An improved version of the extended velocity-azimuth display analysis of single-Doppler radar data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1991, 8(4): 453-466.
- [9] KOPPE, SCHWESOW R L, WERNER C. Remote measurements of boundary layer wind profiles using a CW Doppler lidar [J]. Journal of Climate Applied Meteorol 1984 23(1): 148-158.
- [10] WERNER C. Fast sector scan and pattern recognition for a CW laser Doppler anemometer [J]. Appl Opt 1985 24(21): 3557-3564.
- [11] WAN R, TANG D Zh, ZHANG P, *et al*. Application and comparison of two VAD methods of Doppler radar [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2002 25(5): 648-655 (in Chinese).