

文章编号: 1001-3806(2009)06-0664-03

## 激光测风雷达 VAD 反演方法的数值优化

任鹏<sup>1,2</sup>, 王玉兰<sup>2\*</sup>, 康大勇<sup>3</sup>, 陈涌<sup>1</sup>, 周鼎富<sup>1</sup>, 伍波<sup>1</sup>, 杨泽后<sup>1</sup>, 童静<sup>1</sup>

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 成都理工大学 信息管理学院, 成都 610059; 3. 中国人民解放军 63891 部队, 洛阳 471003)

**摘要:** 为了提高多普勒激光测风雷达反演风场的速度和精度, 采用 Newton-Gaussian 最小二乘优化方法对风场反演模型进行数值求解, 并对 Newton-Gaussian 法的步长和初值进行讨论和调整, 使得此算法的鲁棒性更强, 同时也降低了传统速度方位显示反演方法中固有缺陷的影响。将其应用到研制的全光纤多普勒激光测风雷达系统中, 实现了对低中空局部风场的反演。结果表明, 该算法不但提高了风场反演的速度和精度, 而且反演结果更稳定, 适合实时计算。

**关键词:** 激光技术; 风场反演; 速度方位显示法; Newton-Gaussian 法; 多普勒测风激光雷达

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.030

## Numerical optimization in VAD inversion technique for wind lidar

REN Peng<sup>1,2</sup>, WANG Yu-lan<sup>2</sup>, KANG Da-yong<sup>3</sup>, CHEN Yong<sup>1</sup>, ZHOU Ding-fu<sup>1</sup>,  
WU Bo<sup>1</sup>, YANG Ze-hou<sup>1</sup>, TONG Jing<sup>1</sup>

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. College of Information Management, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. 63891 Unit of People's Liberation Army, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In order to improve the speed and accuracy of inversion of the wind obtained with a Doppler wind lidar, optimized Newton-Gaussian method of least squares was used to solve the wind inversion model. Its step-size and initial value of Newton-Gaussian were discussed and adjusted so that the method became more robust, and some inherent defects of traditional methods of velocity azimuth display (VAD) inversion were overcome. The inversion of low and mid partial wind-field was achieved with the algorithm adopted in an all-fiber Doppler weather radar. The algorithm not only improves the speed and accuracy of inversion of the wind, but also makes the result of inversion more stable and suitable for real-time calculation.

**Key words:** laser technique; wind field retrieval; velocity azimuth display method; Newton-Gaussian method; Doppler wind lidar

### 引言

风速是气候学研究的重要参量之一, 大气风速的测量对研究全球气候变化, 提高天气预报精度, 监测机场气流, 优化飞机、轮船航行路线起着十分重要的作用, 局部风场特征也在火箭发射、航天飞机起飞和着陆以及军事等领域具有重要的意义。世界气象组织声称全球风场的主动观测是最具意义和挑战的气象观测之一。现阶段可利用的风场探测手段也有很多, 如微波气象雷达、风廓线仪、多普勒激光测风雷达等等。其中多普勒激光测风雷达以其“晴空”探测能力、高空间分辨率、高时间分辨率等特点占有重要地位, 这种优势对于数值天气预报研究、航空安全预警和军事气象保障等都有显著的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

作者简介: 任鹏(1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事雷达信号处理、数值优化仿真方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wyl@cdut.edu.cn

收稿日期: 2008-07-16; 收到修改稿日期: 2008-09-09

径向风速(即多普勒激光测风雷达测得沿光路方向上的风速分量)不能直接反映待测风场的3维信息, 于是需要选取适当的方法对径向风速进行反演, 求出风场的垂直风速、水平风速及水平风向。20世纪60年代, LHERMITTE 和 BROWNING 等人提出了速度方位显示(velocity azimuth display, VAD)反演方法<sup>[4-10]</sup>, 即假定在均匀风或线性风的条件下, 通过对特定高度层的扫描, 将得到的一系列径向风速拟合为方位角的余弦函数, 最佳拟合的3个参量代表风场3维信息。但由于VAD法存在固定误差, 导致余弦曲线并不光滑, 存在大量的奇异点, 导致最终的测量结果不能很好地反映待测风场信息。针对这一特点, 作者利用 Newton-Gaussian 最小二乘法对数据进行优化求解, 同时调整了 Newton-Gaussian 法的搜索方向和步长, 使其具有较强的鲁棒性, 适合实时计算。

### 1 光速扫描方法及3维风场合成

激光光束圆锥扫描如图1所示,  $O-xyz$  为地面观测

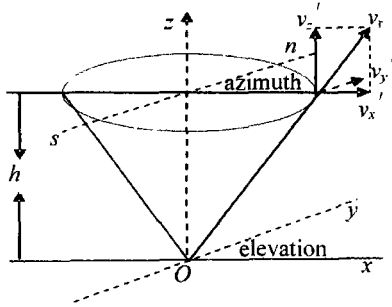


Fig. 1 Schematic illustration of the geometry of the conical scanning 坐标系。其中  $O$  点为测风雷达所在位置,它垂直放置并以一定的仰角  $\theta$  对待测风场进行扫描,扫描旋转角度为  $\varphi$ 。

假设任意风速  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ , 选取正东方向为水平风的正向, 可将测得的径向风速  $v_r$  分解为水平风速分量  $v_h'$  和  $z$  轴分量  $v_z'$ , 得到公式:

$$v_r = v_h' \cos\theta + v_z' \sin\theta \quad (1)$$

再根据扫描角度  $\varphi$  将水平风速分量  $v_h'$  分解为  $x$  轴分量  $v_x'$  和  $y$  轴分量  $v_y'$ , 得到公式:

$$\begin{cases} v_h' = v_x' \cos\varphi + v_y' \sin\varphi \\ \varphi = \arctan \frac{v_y'}{v_x'} \end{cases} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得:

$$v_r = v_x' \cos\varphi \cos\theta + v_y' \sin\varphi \cos\theta + v_z' \sin\theta \quad (3)$$

每一个扫描角度  $\varphi$  对应一个径向风速  $v_r$ , 采用顺时针方向进行扫描, 旋转一周得到一组径向风速。整理(3)式得:

$$v_r = x_1 \cos(\varphi - x_2) + x_3 \quad (4)$$

式中, 参量和风速  $\vec{v}$  之间的关系:  $x_1 = \sqrt{v_x'^2 + v_y'^2} \cos\theta$ ,  $x_2 = \arctan \frac{v_y'}{v_x'}$ ,  $x_3 = v_z' \sin\theta$ 。

$$\begin{aligned} \text{得到风速: } \vec{v} &= (v_x, v_y, v_z) = \\ &(x_1 \cos x_2 / \cos\theta, x_1 \sin x_2 / \cos\theta, x_3 / \sin\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{水平风速: } |v_h| = (v_x + v_y)^{1/2} = x_1 / \cos\theta \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{水平风向为 } x_2, \text{ 垂直风速(取向上为正向):} \\ |v_v| = x_3 / \sin\theta \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{总风速: } |\vec{v}| = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2} \quad (8)$$

VAD 法扫描方式中, 每一个高度层都对应一组标准的余弦曲线, 余弦曲线的 3 个参量代表各个高度层的风场信息。但由于受到测量仪器精密密度、地表杂波干扰、大气稳定性及激光脉冲重频等因素的影响, 使得曲线并不完全光滑。于是利用 Newton-Gaussian 最小二乘法对原始数据进行拟合优化, 使其能准确地反映风场信息。

## 2 风场反演的数值求解方法

假设测风雷达测得一组径向风速数据  $(\varphi_i, v_{r,i})$ ,

$i = 1, 2, \dots, m$ 。由上述结论可知, 这组数据近似满足一条标准的余弦曲线, 于是利用 Newton-Gaussian 最小二乘法拟合余弦函数  $f(\varphi, x), x \in R^3$ 。

定义  $r_i = v_{r,i} - f(\varphi, x) (i = 1, 2, \dots, m)$  为残量函数  $r: R^3 \rightarrow R^m$  的分量, 则(8)式可转化为函数:

$$\phi(x) = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T(x) \mathbf{r}(x) \quad (9)$$

的最小化问题(T 表示转置), 即找到最优解  $x'$  使得残量函数值最小, 得到  $\phi$  的梯度向量和黑塞矩阵分别为:

$$\begin{cases} \nabla \phi(x) = \mathbf{J}^T(x) \mathbf{r}(x) \\ \mathbf{H}_\phi(x) = \mathbf{J}^T(x) \mathbf{J}(x) \end{cases} \quad (10)$$

对于风场模型来说:

$$\mathbf{J}(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial r_1(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial r_1(x)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial r_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial r_2(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial r_2(x)}{\partial x_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_m(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial r_m(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial r_m(x)}{\partial x_3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

再用  $x^{(k)}$  表示近似解, 步长  $s^{(k)}$  由正规方程组:

$$[\mathbf{J}^T(x^{(k)}) \mathbf{J}(x^{(k)})] s^{(k)} = -\mathbf{J}^T(x^{(k)}) \mathbf{r}(x^{(k)}) \quad (12)$$

得出, 通过  $\mathbf{J}(x^{(k)})$  的正交分解进行求解。搜索的方向及步长为:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + s^{(k)} \quad (13)$$

选取适当初值  $x^{(0)}$  重复以上过程直到收敛到最优解  $x'$ , 最终求得风场的 3 维信息。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模拟实验

为检验上述模型的精度和运算速度, 利用 MATLAB 软件进行数值仿真。先假设风速  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = (8\text{m/s}, 8\text{m/s}, 1\text{m/s})$ , 得到整个等距圈层的径向风速  $v_r$  的理论值, 再加入随机噪声来模拟原始雷达数据, 如图 2 所示。利用上述算法取初值  $\vec{v}_0 = (v_x, v_y, v_z) =$

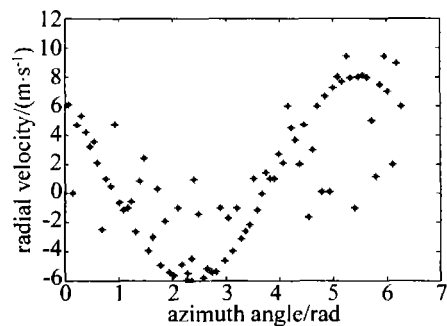


Fig. 2 The original lidar data (1m/s, 1m/s, 1m/s), 经过两次迭代收敛到最优解, 得到风速  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = (7.91\text{m/s}, 8.1\text{m/s}, 1.06\text{m/s})$ , 均方误差  $\sigma = 0.21\text{m/s}$ 。在图 2 的基础上

用实线画出拟合后的余弦曲线图,如图3所示,可以看出,此余弦曲线已经很好地反映了风场信息。

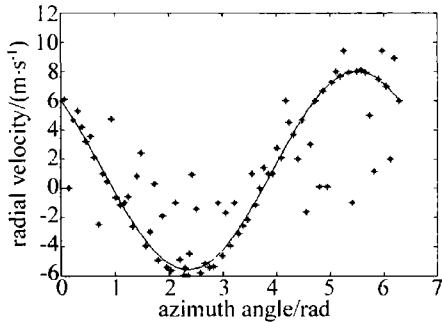


Fig.3 Cosine curve after fitting

在上述模型的应用中,选择合理的初值是至关重要的。当初值远离解时,就不能保证算出的步长  $s^{(k)}$  仍是最优下降方向,这样不但使得迭代的次数大量增加,而且会导致精度很差,所以需要控制初值来减少迭代次数,进而提高运算速度和精度。依然采用上述数据,选取不同的初值进行迭代,同时将几个特殊初值的迭代次数和均方误差列于表1中。可以发现,当初值

Table 1 Iterative times and root mean square error  $\sigma$  with various initial value

initial value	iterative time	root mean square error $\sigma$
$\vec{v}_0 = (10\text{m/s}, 10\text{m/s}, 10\text{m/s})$	2	0.21
$\vec{v}_0 = (100\text{m/s}, 100\text{m/s}, 200\text{m/s})$	2	0.21
$\vec{v}_0 = (100\text{m/s}, 50\text{m/s}, 100\text{m/s})$	4	0.35
$\vec{v}_0 = (-100\text{m/s}, 200\text{m/s}, 100\text{m/s})$	10	0.41

中  $\arctan(v_x/v_y)$  即水平风向接近解时,迭代的次数较少,精度也很稳定;而当其与解的出入较大时,迭代次数将增加很多,且误差较大。所以在风场反演之前,需要对待测大气的3维风速有一个大体估计,这样不但能提高反演速度,而且精度上也有一定保障。

### 3.2 实测实验

西南技术物理研究所研制的全光纤多普勒激光测风雷达如图4所示。该系统采用  $1.55\mu\text{m}$  人眼安全的

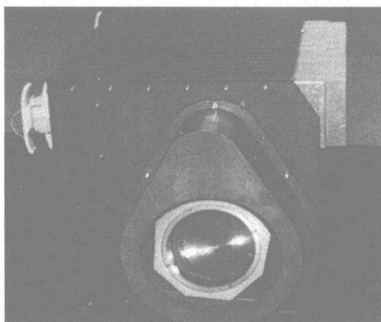


Fig.4 Laser Doppler velocimeter

窄线宽光纤激光器作为激光照射源,利用棱镜圆锥扫描技术(见图5)实现对3维风场的测量,再通过一块120M,14bit的高速A/D采样板及实时FPGA+DSP信息处理电路,对探测到的实际多普勒信号进行实时检

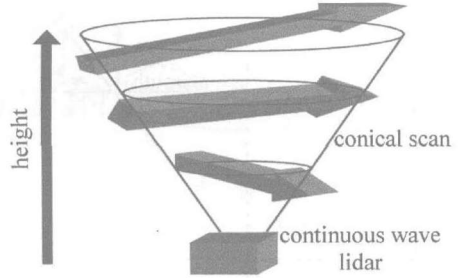


Fig.5 Schematic illustration of the conical scanning

测处理,同时采用上述算法对测得的径向风速进行反演,最终获得3m~350m的大气3维风场信息。

图6中给出了利用上述系统对距离10m的风场进行扫描得到的原始数据曲线和拟合后的数据曲线,

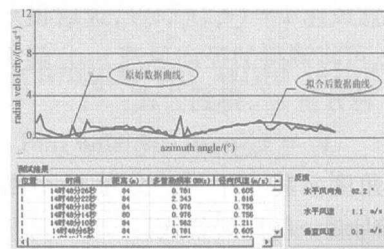


Fig.6 Comparison between original data and the one after fitting

其中采用  $22.5^\circ$  的仰角,通过棱镜旋转1周得到径向风速的原始数据,由于采用方法和仪器的因素,测得的径向风速均为正值,但并不影响上述算法的应用。可以看出,拟合后的余弦曲线不但保留了原始数据的特征,而且修正了一些小幅度的奇异点,很好地反映了待测风场的信息。最终得出风场的水平风速  $1.1\text{m/s}$ ,垂直风速  $0.3\text{m/s}$ ,水平风的方向角  $82.2^\circ$ 。与测风仪测得的风速基本吻合。

### 4 结论

在多普勒激光测风雷达大气风场反演方法中,VAD法以其计算简单、运算量小等特点,近年来得到了广泛应用,但由于存在一定误差,导致求解精度不高。本文中针对这一特点,提出了利用Newton-Gaussian优化方法对风场反演模型进行求解,并结合大量实测数据对Newton-Gaussian法的搜索方向和步长进行调整和讨论,使其具有更高的修正失真数据和消除较小奇异点干扰的能力。应用结果表明,该算法不但提高了风场反演的速度和精度,而且反演结果更稳定,适合实时计算。

### 参考文献

[1] WANG Zh K, BI J M, ZHOU X, *et al.* Investigation on dual-beam Doppler speedometer based on  $\text{CO}_2$  lasers [J]. Laser Technology, 2006,30(2):183-185 (in Chinese).

[2] LIU J Q, BU L B, ZHOU J, *et al.* Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection Doppler wind lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006,33(10):1339-1344 (in Chinese).

一次未告警,则试验次数必须达到 87 次,才可以认为装备的指标满足要求。

从以上计算可以看出,在其它参量不变时,装备的指标值对于试验次数有很大影响。

如果装备指标值为 0.98 保持不变,犯两类错误的概率变为  $\alpha = 0.05, \beta = 0.05$ , 则:当试验次数为 24 次,且全部告警时,即可认为装备的指标满足要求,如果有一次未告警,则试验次数必须达到 117 次,才可以认为装备的指标满足要求。

同样从以上计算可以看出,在其它参量不变时,犯两类错误的概率取值对于试验次数同样有很大影响。

## 5 结 论

序贯法在试验过程中未出现未告警时与经典数理统计法相比,可以显著减小试验次数,从而可以缩短试验周期,降低试验消耗。但其不足是每次试验后需要计算  $O$ , 看能否采取某种决策,给实际使用带来不便。同时,计算结果表明:装备的指标值和犯两类错误的概率取值对需要的试验次数具有很大影响。

### 参 考 文 献

- [1] TANG X M, ZHANG J H. Test analysis and evaluation of weapon system in small-sample circumstances [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 68-77 (in Chinese).
- [2] ZHAO L, LI J Y. Research on small example maintainability experimentation and evaluation of bayes-based theory [J]. Ship Electronic Engineering, 2006, 26(1): 113-117 (in Chinese).
- [3] KANG L, DONG Sh G, GUO N L. Armament test evaluation and load calculation based on bayesian assessment [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(6): 30-33 (in Chinese).
- [4] WANG L D, SHEN X J, WANG G Y. Evaluation method for radar equipment test in small-subsample circumstances [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(5): 523-525 (in Chinese).
- [5] TANG X M, ZHOU B Zh, LI R. Integrated test design and evaluation technology of weapon system in small sample situation [J]. Tactical Missile Technology March, 2007(2): 51-56 (in Chinese).
- [6] LI Zh Sh, LI J Sh, ZHANG J T, et al. The application of bayes fusion method in weapon small-sample test circumstances [J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(3): 64-67 (in Chinese).
- [7] YANG Z F, QIAN H W, GAO G H. Development of laser warning technology [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 28-32 (in Chinese).
- [8] GE Q Sh, GONG Ch K. Reconnaissance performance analysis for vehicular laser warning device [J]. Laser & Infrared, 2003, 32(3): 4-7 (in Chinese).
- [9] WANG G Y, SHEN X J, WANG L D, et al. Small-sample test theory and technique of electronic system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 144-148 (in Chinese).
- [10] CHEN X L, CHEN J, JIANG P Ch, et al. Radar test [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 182 (in Chinese).
- [1] TANG X M, ZHANG J H. Test analysis and evaluation of weapon system in small-sample circumstances [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 68-77 (in Chinese).
- [2] ZHAO L, LI J Y. Research on small example maintainability experimentation and evaluation of bayes-based theory [J]. Ship Electronic Engineering, 2006, 26(1): 113-117 (in Chinese).
- [3] KANG L, DONG Sh G, GUO N L. Armament test evaluation and load calculation based on bayesian assessment [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(6): 30-33 (in Chinese).
- [4] WANG L D, SHEN X J, WANG G Y. Evaluation method for radar equipment test in small-subsample circumstances [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(5): 523-525 (in Chinese).
- [5] TANG X M, ZHOU B Zh, LI R. Integrated test design and evaluation technology of weapon system in small sample situation [J]. Tactical Missile Technology March, 2007(2): 51-56 (in Chinese).
- [6] LI Zh Sh, LI J Sh, ZHANG J T, et al. The application of bayes fusion method in weapon small-sample test circumstances [J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(3): 64-67 (in Chinese).
- [7] YANG Z F, QIAN H W, GAO G H. Development of laser warning technology [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 28-32 (in Chinese).
- [8] GE Q Sh, GONG Ch K. Reconnaissance performance analysis for vehicular laser warning device [J]. Laser & Infrared, 2003, 32(3): 4-7 (in Chinese).
- [9] WANG G Y, SHEN X J, WANG L D, et al. Small-sample test theory and technique of electronic system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 144-148 (in Chinese).
- [10] CHEN X L, CHEN J, JIANG P Ch, et al. Radar test [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 182 (in Chinese).

(上接第 666 页)

- [3] HU H W, HU Q Q. Beam scanning and inversion method for lidar detecting wind [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(6): 720-731 (in Chinese).
- [4] TAO Z Y. A study of Doppler radar VAD technique [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995, 6(1): 109-113 (in Chinese).
- [5] SUN J Z, FLICKER D W, LILLY D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature field from simulated single-doppler radar data [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1991, 48(6): 876-890.
- [6] WALDTEUFEL P, CORBIN H. On the analysis of single-Doppler radar data [J]. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(4): 532-542.
- [7] 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.
- [8] ROBERT R, DUSAN Z. Subsynchronous-scale vertical wind revealed by dual Doppler-radar and VAD analysis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1980, 37(8): 644-654.
- [9] SRIVASTAVA R C. A method for improving rain estimates from vertical-incidence Doppler radar observations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(5): 769-773.
- [10] WAN R, TANG D Zh, ZHANG P, et al. VAD elementary analysis of nonlinear wind field [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2003, 23(3): 314-324 (in Chinese).