

文章编号: 0258-7025(2008)04-0515-04

# 激光测风雷达速度方位显示反演中 数据质量的控制方法与仿真

王春晖 李彦超 徐 博 李生福

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 针对实际数据资料中往往因地表杂波等各种干扰而出现小幅值风速和奇异点,在进行速度方位显示(VAD)数据反演之前,提出了对数据资料进行质量控制的预处理方法,即剔除小幅度数据和奇异点,然后分别进行了全方位采样和非全方位采样的反演,反演精度大幅度提高,仿真结果与实际结果相吻合。模拟两种线性风场,即含有 0, 1 阶谐波和含有 0, 1, 2 阶谐波的线性风场。利用这两种风场比较研究了全方位采样和非全方位采样的速度方位显示方法。仿真结果表明,全方位采样速度方位显示方法对这两种线性风场反演结果准确度都高,而非全方位采样速度方位显示方法对不含 2 阶谐波的线性风场具有很小的有效采样范围,同时,2 阶谐波对其具有一定的影响。

**关键词** 激光技术;激光测风雷达;数据处理;反演;数据质量控制

中图分类号 TN 958.98 文献标识码 A

## Method and Simulation of Data Quality Control in Velocity Azimuth Display Inversion of Wind Lidar

Wang Chunhui Li Yanchao Xu Bo Li Shengfu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optoelectronics,  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** Since practical data information often contains small-amplitude wind speed and singularity point because of lots of disturbance such as earth-surface clutter, we put forward a method of pretreatment for quality control to data information before the velocity azimuth display (VAD) data inversion, which eliminates small-amplitude data and singularity point, then we proceed omnidirectional sampling and non-omnidirectional sampling inversion respectively. The precision of inversion is improved a lot, and the result of the simulation is consonant with reality. We simulate two kinds of linear wind field, that is, the linear wind field with the zero, first order harmonics and the zero, first, second order harmonics. We research into the omnidirectional sampling and non-omnidirectional sampling VAD methods by using the two kinds of wind field's comparison. The result of this simulation indicates that the omnidirectional sampling VAD method has high performance in both two kinds of linear wind field's inversion results, while the non-omnidirectional sampling VAD method has a very small effective sampling range in the linear wind fields without the second order harmonic, meanwhile, this method is affected by the second order harmonic partly.

**Key words** laser technique; wind lidar; data processing; inversion; data quality control

## 1 引 言

激光测风雷达是目前探测晴空大气精细结构最有效的光学遥测手段之一。它与微波气象雷达、风廓线仪相比,最突出的优点是“晴空”探测能力、高空

间分辨率、高时间分辨率,如风速精度小于 1 m/s,距离分辨率小于 50 m,这种优势对于中小尺度大气湍流非线性动力学过程、数值天气预报研究、航空安全预警和军事气象保障等都有重要的科学意义和显

收稿日期:2007-09-03;收到修改稿日期:2007-11-27

基金项目:国家自然科学基金(60577032)资助项目。

作者简介:王春晖(1965—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要从事相干激光成像雷达、激光大气遥感、微弱信号检测等方面的研究。E-mail:wangchunhui02@sohu.com

著的应用前景<sup>[1~3]</sup>。

速度方位显示(VAD)方法<sup>[4~6]</sup>是一种经典的水平风速风向反演方法。Robert Rabin 等<sup>[6]</sup>利用最小二乘解法,忽略二次谐波,复数展开,对不均匀数据场提取水平风场和平均散度信息,但这种方法未考虑垂直速度的影响。Srivastava<sup>[7]</sup>假设在某一高度上水平散度和垂直速度在较小的高度内不变,应用不同仰角或不同距离门的径向速度资料,得到多个水平散度和垂直速度值,再用最小二乘法,得到这两个量的最佳估计值,这一方法简称改进速度方位显示(EVAD)方法。Thomas 等<sup>[8]</sup>又对改进速度方位显示方法做了改进,进行了适当的加权处理,补偿计算水平散度和垂直速度的误差。对于某些特定条件、特殊用途,国内外又发展起一些其他反演方法,如速度体积处理(VVP)<sup>[9,10]</sup>、速度方位处理(VAP)<sup>[11,12]</sup>、动力学反演方法<sup>[13~15]</sup>等。

本文通过模拟两种线性风场、采用数据质量控制、剔除地表杂波等各种干扰而出现的小幅值风速和奇异点,提高速度方位显示方法的反演精度。

## 2 反演中数据质量的控制方法

激光测风雷达常用的扫描方式有平面位置扫描(PPI)和垂直高度扫描(RHI)两种。对于机场的应用,平面位置扫描的方式非常广泛。速度方位显示方法实际上就是从平面位置扫描资料中得到水平风场的风场信息,通过扫描不同的距离圈,得到垂直风廓线。

速度方位显示以一个恒定的仰角做全方位扫描,获取距离门上气象回波信号的径向风速序列。速度方位显示平均风速风向反演过程为:将特定高度上的一系列径向速度拟合为方位角的  $\sin$  函数,最佳拟合振幅即为平均风速,从对应相位中得到该高度上的水平风向,变换距离门和仰角,得到不同高度上的水平平均风速和风向。速度方位显示方法的详细推导及数学模型见参考文献<sup>[4]</sup>。下面主要分析速度方位显示反演精度误差来源及质量控制:

1) 仪器误差。速度方位显示方法测量任一特定高度上的速度的一大优点,就是只需要以一个固定的仰角进行全方位扫描就可以求出风场分量,而不需要测量和比较不同仰角的结果。理所当然要求对仰角的测量比较精确,以减小误差。然而,在通常条件下,这种误差对风速的测量并不会带来很大的误差。对微波气象雷达而言,在单个旋转期间,天线仰角完全可以保持  $\delta\alpha \leq 0.25^\circ$ ; 对相干激光测风雷

达来说,由于光学孔径相对小很多,所以精度可以更高,如 WindTracer 的定位精度可以达到  $0.1^\circ$ <sup>[1]</sup>。由  $z = R \tan\alpha$  (其中  $z$  为探测点距雷达的水平距离,  $R$  为探测点距雷达的径向距离,  $\alpha$  为天线仰角), 可知  $\delta z = R(\sec^2\alpha)\delta\alpha$ 。对于通常的低角度扫描,  $0 \sim 25^\circ$ ,  $\sec\alpha$  几乎都为 1, 所以,对于典型激光雷达 10 km 的探测距离,  $\delta z < 2.5$  m, 这完全是一个可以接受的误差。

2) 扫描圈内风场不均匀性。在速度方位显示固定仰角之后,对方位角进行扫描。这样,就可能会因为大气反射率分布的不均匀性,以及风场参量的不均匀性,而导致有些测量布局有代表性,从而给平均水平风场的测量带来误差。

研究表明,速度方位显示技术的固有误差是服从随机正态分布的,均值几乎为零,方差也是一个很小的量,对微波而言,工程估计误差一般在 1 m/s。对多普勒激光雷达,误差还会更小。

3) 小幅值风速的影响。在雷达资料中,由于各种原因会出现非常小的风速,这种风可能出现在任何一个高度上。将正确的小幅值风速与误差量区分开是完全可以做到的,但实际上,大量的小幅值风速,无论其是正确的还是误差,都会使低风速的反演结果变得特别差。所以,对于这种情况,最好的处理方式应该是设置合理的阈值,比如 1 m/s,然后将低于这个幅值的速度表示为损坏数据,从而将其剔除。对激光雷达,由于其分辨率高得多,所以可以设得低一些。

4) 奇异点的影响。相比于初步分析的风场以及同一雷达站邻近区域和邻近时间的风场而表现出明显的不一致的资料点,称之为奇异点。所以说,奇异点可以是任意幅值的。不过目前这种风场误差的真正原因还不清楚,一般都是假设在一个较大的距离内,呈均匀分布。通过特殊的质量控制方法,可以处理这种奇异点。

以上分析的只是其中几种比较典型的误差。还有一个很大的误差来源,那就是鸟的迁徙。在这里不做研究。

5) 风场数据质量控制。由以上分析可知,对于速度方位显示反演的固有误差,在质量控制中可以不考虑。因为这些误差来源于系统本身,服从随机正态分布,均值几乎为零,方差也是很小的量,因此误差在可以接受的范围之内。所以在这里主要研究其余两种常见的误差来源,对其进行适当的控制,以保证速度方位显示反演结果的准确度。

对小幅值速度的处理,只要设置合适的速度阈值,将低于阈值的风速量滤除,即可有效控制小幅值速度对反演结果的影响。

奇异点的处理需要用特定的算法。为了剔除奇异点,首先对某一圈层上的数据计算一个速度方差

$$s^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M [V_{ri}(\theta_i) - V'_{ri}(\theta_i)]^2,$$

式中  $M$  为整个等距离圈层上的采样点数目;  $V_{ri}(\theta_i)$  为该圈层上方位角为  $\theta_i$  时的实测径向速度值;  $V'_{ri}(\theta_i)$  为经过初步速度方位显示分析后,得到的在方位角  $\theta_i$  处的径向速度。

如果某一距离圈的速度方差小于某一阈值  $s_{\min}$ , 如  $s_{\min} = 1 \text{ m/s}$ , 则这一速度方位显示分析有效。否则该圈层每一个有速度值的点求出一个  $\Delta V_r = |V_{ri} - V'_{ri}|$ , 若  $\Delta V_r$  大于某个阈值, 如  $1.5s$ , 则认为该点为奇异点, 将其剔除。经过一次剔除后, 再重复上述计算, 直至该圈层上的  $s$  小于  $s_{\min}$ , 再用同样的方法处理下一个距离圈数据。

### 3 数值仿真与分析

利用英国的 QinetiQ 激光测风雷达数据资料进行数据反演。按照质量控制方法, 先是对小幅值风速设置合适的阈值将其剔除, 然后对每一距离圈的方差进行计算, 根据阈值判断和提出奇异点。数值计算结果见图 1~4。

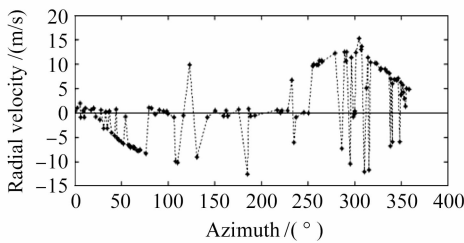


图 1 原始雷达数据速度方位显示  
Fig. 1 VAD of original lidar data

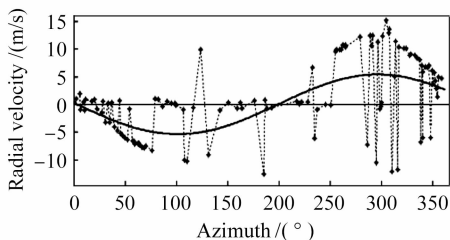


图 2 原始雷达数据的最小二乘拟合

Fig. 2 Least squares fitting of original lidar data

图 1 是直接反演一个距离圈雷达资料的速度方位结果。从中可以看到, 雷达资料的整体轮廓符合

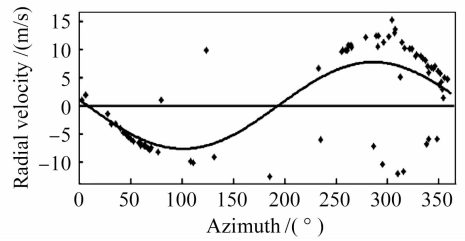


图 3 剔除小幅值速度后的最小二乘拟合  
Fig. 3 Least squares fitting after small-amplitude speed is eliminated

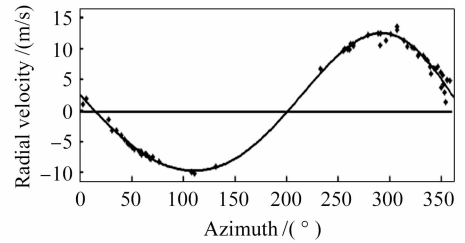


图 4 质量控制后的最小二乘拟合

Fig. 4 Least squares fitting after quality control

余弦函数的包络, 但其中包含大量的小幅值速度点, 尤其是在  $250^\circ$  之前, 有大量的幅值近为零的径向速度, 同时还包含明显的奇异点。

图 2 为对图 1 的原始资料进行余弦函数拟合, 实线为拟合曲线。直观上看, 拟合结果与实际的余弦函数包络出入比较大。拟合结果的均方根误差为  $5.6 \text{ m/s}$ , 远大于雷达要求的风速精度, 所以无法反映真实的风场信息。可见, 小幅值风速和奇异点对反演结果具有很大的影响。

在图 3 中设置径向速度幅值阈值为  $1 \text{ m/s}$ , 则可以剔除低于  $1 \text{ m/s}$  的数据, 然后进行余弦曲线拟合。可见, 拟合的结果比图 2 中没有经过小幅值资料剔除的结果有所提升, 但是, 与真实的包络轮廓还有比较大的出入, 尤其是在方位角为  $230^\circ \sim 360^\circ$  之间。主要原因是这一方位角范围内存在大量的奇异点, 影响了结果的真实性。

在图 4 中设置均方根误差为  $1 \text{ m/s}$  的阈值, 逐点计算, 如超过此阈值的数据, 则认为是奇异数据, 剔除掉, 然后再剔除奇异点后的数据进行余弦曲线拟合。拟合结果的均方根误差为  $0.2 \text{ m/s}$ 。从图 4 可见, 拟合效果非常好, 拟合曲线已经可以真实反映雷达资料的风场信息。

总之, 从整个质量控制过程来看, 雷达数据中的小幅值速度和奇异点对反演结果的影响很大, 在进行速度方位显示反演之前, 必须对其进行数据质量控制。本文仅对线形风场进行了数据质量控制分

析,很好地改善了资料质量,反演结果可满足风速反演的精度要求。但对于非线性风场,数据质量控制还有待进一步研究。

## 4 结 论

在激光测风雷达大气风场反演速度方位显示方法中,小幅值速度和奇异点数据是影响反演精度的重要因素。在速度方位显示反演之前,通过引入数据质量控制算法,大幅度提高水平风廓线、垂直风廓线及三维矢量风场图的反演精度。对小幅值速度处理,通过设置合适的速度阈值,将低于阈值的风速量滤除,可有效控制小幅值速度对反演结果的影响。对于奇异点数据处理,首先对某一圈层上的数据,计算速度方差。如果某一距离圈的速度方差小于某一阈值(如1 m/s),则速度方位显示分析有效,否则该圈层每一个有速度值的点求出其方差,若方差大于某个阈值(如1 m/s),则认为该点为奇异点,将其剔除。经过一次剔除后,再重复上述计算,直至该圈层上的方差小于阈值,再用同样的方法处理下一个距离圈数据,如此循环。

## 参 考 文 献

- 1 Wind Tracer Product Guide for Airport Surveillance Applications [M]. April, 2000 Prepared by: CLR Photonics, Inc. a Division of Coherent Technologies, Inc. 2000. 1~15
- 2 Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection Doppler wind lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1339~1344  
刘继桥,卜令兵,周 军 等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1339~1344
- 3 Hu Hongwei, Hu Qiquan. Beam scanning and inversion method for lidar detecting wind [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 720~731  
胡宏伟,胡企铨. 星载激光测风雷达的光束扫描及风场反演 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(6):720~731
- 4 R. M. Lhermitte, D. Atlas. Precipitation motion by pulse

- Doppler. Preprints ninth weather [C]. *Conf. Amer. Meteor. Soc.*, 1961. 218~223
- 5 Tao Zuyu. A study of Doppler radar VAD technique [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1995, **6**(1):109~113  
陶祖铨. 关于 Doppler 雷达 VAD 技术的讨论[J]. *应用气象学报*, 1995, **6**(1):109~113
- 6 Robert Rabin, Dusan Zrnica. Subsynchronous-scale vertical wind revealed by dual Doppler-radar and VAD analysis [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, **37**(8):644~654
- 7 R. C. Srivastava. A method for improving rain estimates from vertical-incidence Doppler radar observations [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1990, **7**(5):769~773
- 8 Thomas Matejka, Ramesh C. Srivastava. An improved version of the extended velocity-azimuth display analysis of single-Doppler radar data [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1991, **8**(4):453~466
- 9 P. Waldteufel, H. Corbin. On the analysis of single-Doppler radar data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, **18**(4):532~542
- 10 Albert J. Koscielny, R. J. Doviak, R. Rabin. Statistical considerations in the estimation of divergence from single-Doppler radar and application to preterm boundary-layer observations [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, **21**(2):197~210
- 11 Tao Zuyu. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, **50**(1):81~90  
陶祖铨. 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
- 12 Bai Jie, Tao Zuyu. The pre-processing of Doppler radar wind retrieval VAP technique [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, **11**(1):21~26  
白 洁,陶祖铨. 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
- 13 J. Z. Sun, D. W. Flicker, D. K. Lilly. Recovery of three-dimensional wind and temperature field from simulated single-Doppler radar data [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**(6):876~890
- 14 C. Qiu, Q. Xu. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data [J]. *J. Atmos. Oceanic. Tech.*, 1992, **9**(5):588~598
- 15 Q. Xu, J. Qiu, J. Yu. Adjoint method retrievals of low altitude wind fields from single-Doppler reflectivity measured during phenix [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1994, **11**(4): 275~288