

单多普勒激光雷达机场小尺度风场反演研究

蒋立辉, 范道兵, 庄子波, 熊兴隆

(智能信号与图像处理天津市重点实验室 中国民航大学电子信息工程学院, 天津 300300)

摘要:基于机场上空小尺度风场结构特点以及单多普勒激光雷达测风原理,本文在现有气象雷达三维风场反演的VVP方法的基础上,提出一种基于三维风场在分析体积内均匀分布假设的几何反演算法。此方法对单多普勒激光雷达测得的径向速度进行处理,实现对机场上空实际风速大小及其角度的反演,进而对风切变等灾害性天气完成探测。通过反演数据与原始数据进行比较,分析反演误差,结果表明几何方法能够较好的反映小尺度风场变化趋势。

关键词:风场反演;多普勒激光雷达;VVP算法;几何算法

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A

Research of airport microscale wind field retrieval with single Doppler lidar

JIANG Li-hui, FAN Dao-bing, ZUZHANG Zi-bo, XIONG Xing-long

(Intelligence Signal and Image processing Key Lab in TianJin, College of Electronic Information Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract:Based on low level micro scale atmosphere model above the aerodrome and the characteristics of Doppler lidar wind data, a new method of geometric algorithms is proposed for meteorological radar wind 3D retrieval. The algorithm is an improvement to the existing VVP theories and algorithms. The algorithm is under the assumption that a 3 D wind field is locally homogeneous. The method processes the radial velocity, which is detected by Doppler lidar, to retrieval the actual wind speed and angle. So we can detect the wind shear and other disastrous weather. By comparing the retrieval data with the original data, analysis of retrieval errors was made, the result shows that the geometric method can better reflect the variation trend of micro-scale wind field.

Key words: wind retrieval; Doppler lidar; VVP algorithm; geometric algorithm

1 引言

我国是自然灾害频发的国家,尤以气象灾害最为突出。对于民航来讲,气象状况的好坏直接影响着飞机能否正常飞行。素有“无形杀手”和“空中陷阱”之称的低空风切变就是一种严重影响飞机飞行的大气现象。据统计,因低空风切变而发生的飞机事故约占飞机起降事故的30%。因此,能够准确探测在低空发生的风切变将有显著的社会意义和经济效益。

多普勒测风激光雷达属于主动测量系统,它向大气发射激光脉冲并测量不同高度上返回信号的多

普勒频移,根据频移量的大小计算风速^[1]。而且激光雷达具有高角分辨率、高速度分辨率、高距离分辨率、强抗干扰能力,以及出色的全天候工作能力,是目前晴空条件下能探测三维风场的有效手段。机场上空天气属于低空小尺度天气系统,所以利用多普勒激光雷达资料可以实现反演小尺度三维风场,进而对风切变进行探测预报。

基金项目:中央高校基本科研基金(No. ZXH2009B001);中央高校基本科研基金(No. ZXH2010D020)资助。

作者简介:蒋立辉(1964-),男,教授,硕士生导师,主要从事激光雷达,图像处理及光电子技术等研究工作。Email:jlhht@163.com

收稿日期:2010-07-20; **修订日期:**2010-08-30

Waldteufel 和 Corbin 于 1979 年提出 VVP 方法^[2],采用径向、切向及垂直三个方向构成的三维空间为分析体积。通过风场在分析体积中呈线性分布假设,理论上可反演出三维风场的九个变量。VVP 算法中会遇到复杂矩阵运算和病态矩阵的求解问题^[3-6],致使反演很困难。在分析体积内,风场线性分布假设往往与实际风场不相吻合,使得 VVP 算法反演的误差较大^[7]。实际上,在一个很小的体积内,风场是比较均匀的。因此,本文提出一种基于风场均匀分布假设的 VVP 算法,称之为几何算法。实验证明,几何算法可以较好地反映风场的趋势。

2 算法介绍

Waldteufel 和 Corbin 首先提出 VVP (velocity volume process) 的构想^[5],采用径向、切向及垂直三个方向构成的三维空间为分析体积,如图 1 所示。在若干假设条件下理论可求出水平风向、风速、辐散场、变形场和风切变等九个变量。

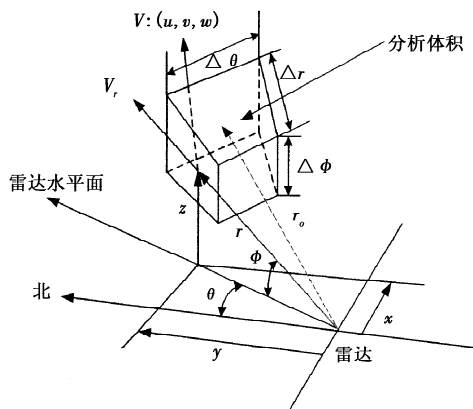


图 1 VVP 分析体积图

Fig. 1 the analytic volume of VVP

在分析体积内部假设:

(1) 径向风场在空间中呈线性变化;

(2) 扫描时间内,分析体积之中风场不随时间而改变。

在直角坐标上以雷达中心为原点,分析体积中心点为 (x_0, y_0, z_0) , 风速矢量为 $V_0: (u_0, v_0, w_0)$, 小中心周围各点风速 $V: (u, v, w)$ 在假设条件(1)之下 V 和 V_0 的关系可以写为:

$$\begin{cases} u = u_0 + u'_x(x - x_0) + u'_y(y - y_0) + u'_z(z - z_0) \\ v = v_0 + v'_x(x - x_0) + v'_y(y - y_0) + v'_z(z - z_0) \\ w = w_0 + w'_x(x - x_0) + w'_y(y - y_0) + w'_z(z - z_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $u'_x, u'_y, u'_z, v'_x, v'_y, v'_z, w'_x, w'_y, w'_z$ 分别表示三个速度分量 u, v, w 在三个方向 x, y, z 上的线性

因子。

取正北方向为 0° , 在极坐标下径向风速为:

$$V_r = -ucos\theta cos\phi - vcos\theta cos\phi - wsin\phi \quad (2)$$

式中, θ 为雷达方位角; ϕ 为天线仰角, 并且:

$$\begin{aligned} x &= Rsin\theta cos\phi \\ y &= Rcos\theta cos\phi \\ z &= Rsin\phi \end{aligned} \quad (3)$$

式中, R 为各资料点到雷达中心的距离, 所以分析体积中心周围各点的 V_r 表示为:

$$\begin{aligned} V_r &= cos\theta cos\phi(u_0 - u'_x x_0 - u'_y y_0 - u'_z z_0) + \\ &sin\theta cos\phi(v_0 - v'_x x_0 - v'_y y_0 - v'_z z_0) + \\ &sin\phi(w_0 - w'_x x_0 - w'_y y_0 - w'_z z_0) + \\ &Rcos^2\theta cos^2\phi u'_x + \\ &Rsin^2\theta cos^2\phi v'_y + \\ &Rsin\theta cos\theta cos^2\phi(u'_y + v'_x) + \\ &Rsin^2\phi w'_z + \\ &Rcos\theta sin\phi cos\phi(u'_z + w'_x) + \\ &Rsin\theta sin\phi cos\phi(v'_z + w'_y) \end{aligned} \quad (4)$$

为了简化方程, 在运算中将分析体积中心 (x_0, y_0, z_0) 到 $(0, 0, z_0)$, 待计算后再平移回原位置。层状云降水中, $w'_x \cdot u'_z, w'_y \cdot v'_z$, 所以可以忽略 w'_x, w'_y, V_r 简化为:

$$\begin{aligned} V_r &= cos\theta cos\phi u_0 + sin\theta cos\phi v_0 + sin\phi w_0 + \\ &Rcos^2\theta cos^2\phi u'_x + Rsin^2\theta cos^2\phi v'_y + \\ &Rsin\theta cos\theta cos^2\phi(u'_y + v'_x) + \\ &sin\phi(Rsin\phi - z_0)w'_z + \\ &cos\theta cos\phi(Rsin\phi - z_0)u'_z + \\ &sin\theta cos\phi(Rsin\phi - z_0)v'_z \end{aligned} \quad (5)$$

再经过线性最小平方法, 即在风场分析体积中呈线性变化的假设下, 将所测得之径向风场 V_r 以 F 表示, 故可将上式 V_r 表示为:

$$F = \sum_{j=1}^9 \frac{\partial F}{\partial u_j} u_j \quad (6)$$

式中, u_j 为风场变量; $\frac{\partial F}{\partial u_j}$ 为极坐标中的各系数。根据最小方差方法, 使测量的径向风场与 u_j 线性化的径向风场间差值最小:

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{(V_{ri} - F_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_k} = -2 \sum_{i=1}^N \left(V_{ri} - \sum_{j=1}^9 \frac{\partial F_i}{\partial u_j} u_j \right) \frac{\partial F_i}{\partial u_k} = 0 \quad (8)$$

其中, i 为分析体积内部各资料点; N 为分析体积内部总资料点数; V_r 为实际径向风场; σ 为资料的标准

方差。

展开式(8):

$$\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^9 \frac{\partial F_i}{\partial u_j} \frac{\partial F_i}{\partial u_k} \right) u_j = \sum_{i=1}^N \frac{\partial F_i}{\partial u_k} V_{ri} \quad (9)$$

令 $M_{jk} = \sum m_j m_k$ 则有:

$$\sum_{i=1}^N M_{jk} u_j = \sum_{i=1}^N \frac{\partial F_i}{\partial u_k} V_{ri}$$

$$u_j = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_{jk}^{-1} \right) \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\partial F_i}{\partial u_k} V_{ri} \right) \quad (10)$$

其中, u_j 代表 $u, v, w, u'_x, v'_y, u'_y + v'_x, w'_z, u'_z, v'_z$, 所以理论上只要求出 M_{jk} 的逆矩阵, 则这九个变量都可以求出。

VVP 在理论上可以得到九个变量, 包括平均风场、散度涡度及风场的梯度项, 是个比较理想的多普勒风场反演方法。但是在实际的求取九个变量的时候, 会遇到病态矩阵的问题, 系数的病态矩阵问题严重制约了垂直速度场及其他变量的有效反演。

为此, 本文简化了 VVP 方法, 仅考虑 u, v, w 这三个变量, 分析体积内的三维风速可以由中心点 $(\rho_0, \theta_0, \phi_0)$ (以极坐标表示, 分别为距离、方位角和仰角, 角度单位为度, 下同) 和相邻的两个点 $(\rho_0, \theta_{0+1}, \phi_0)$ 和 $(\rho_0, \theta_0, \phi_{0+1})$ 的径向风速反演获得。

在分析体积内部假设:

(1) 分析体积内的各点三维风场分布完全相同;

(2) 扫描时间内, 分析体积之中风场不随时间而改变。

假设分析体积内的三维风场矢量均为 V_0 , 则该矢量在上述三个点上的径向风速投影为:

$$\begin{cases} V_1 = |V_0| \cos\alpha \cos\beta \\ V_2 = |V_0| \cos(\alpha - 1) \cos\beta \\ V_3 = |V_0| \cos\alpha \cos(\beta - 1) \end{cases} \quad (11)$$

其中, α 为 V_0 与方位角 θ_0 的夹角; β 为 V_0 与仰角 ϕ_0 的夹角; V_1, V_2, V_3 为径向风速。通过式(11)可求得 $|V_0|, \alpha$ 和 β 的大小, 进而求得直角坐标系下的三维风场矢量。

3 程序仿真及实验分析

为了测试本文所提出的方法的有效性, 我们分别对均匀风场和涡旋风场进行反演实验, 并与实际数据进行对比。由于机场属于小尺度天气系统, 所以取一个范围为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的长方体大气作为研究对象, 同时分成 $100 \times 100 \times 68$ 个格点, 因此所得到的空间分辨率分别为水平分辨率 50 m , 垂

直分辨率为 30 m 。

雷达以 1° 方位角分辨率转动 360° , 可获得一个锥面的风场资料。雷达在以 1° 的仰角分辨率扫描, 可获得多个锥面的风场资料。本文采用 $3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ 的扫描仰角获得的锥面风场资料进行反演实验。由于雷达测得只是三维风场在雷达波上的径向分量, 而不是实际三维风场矢量。因此, 我们必须利用雷达测得的径向速度进行风场反演, 得到实际的三维风场矢量。

3.1 均匀风场的反演实验

此次模拟的水平风场为均匀的风场, 几乎无方向上的变化, 只在 x 方向和 y 方向上速度有小范围波动, 一般在 $(-0.5, 0.5)$ 之间。模拟风场的 x 方向的 u 分量速度大小在 8 m/s 左右, 模拟风场的 y 方向的 v 分量速度大小在 6 m/s 左右, 图 2 表示模拟风场风速大小, 图 3 表示模拟风场的风向角度。

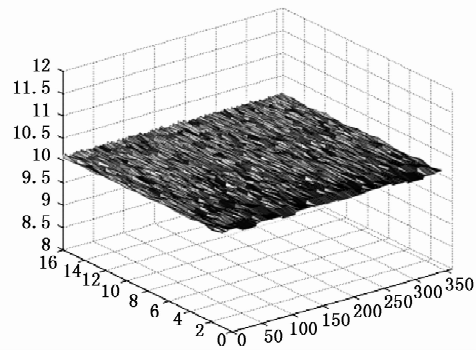


图2 模拟均匀风场的风速大小

Fig. 2 the wind speed of simulated homogeneous wind field

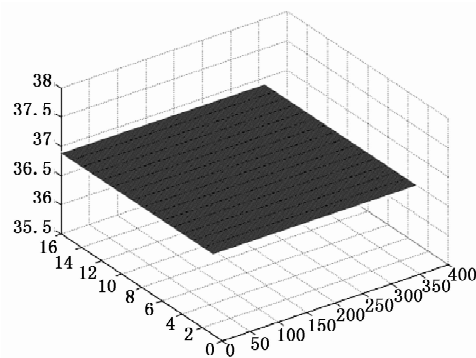


图3 模拟均匀风场的风向角度

Fig. 3 the wind angle of simulated homogeneous wind field

反演出的风速大小如图 4 所示与实际模拟风场风速大小基本一致, 与真实值误差在 0.1 m/s 左右。同样, 反演出的风向角度如图 5 所示与模拟风场风向角度也几乎一致, 最大误差仅有 0.1° 。所以该方法对反演均匀风场是十分有效的。

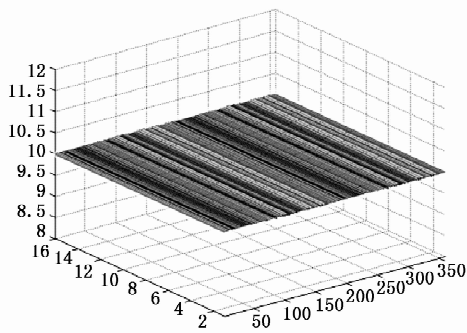


图4 反演均匀风场的风速大小

Fig.4 the wind speed of retrieval homogeneous wind field

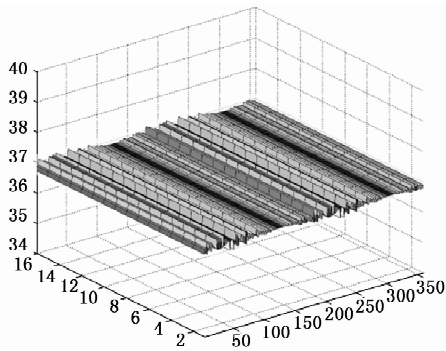


图5 反演均匀风场的风向角度

Fig.5 the wind angle of retrieval homogeneous wind field

3.2 涡度风场的反演实验

在初始风速为3m/s的模拟均匀风场中叠加一些涡旋风场,这些涡旋风场既有辅合风场,又有辅散风场。其中,叠加的涡旋风最大值为11 m/s 最小值为0.5 m/s 的涡旋风场。涡旋风处于方位角30°~70°,径向距离为8~16个单位长度之间的区域。图6表示模拟风场风速大小,图7表示模拟风场的风向角度。

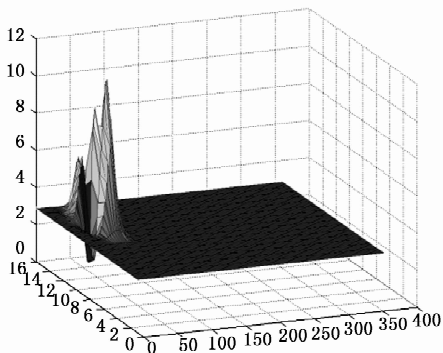


图6 模拟涡旋风场的风速大小

Fig.6 the wind speed of simulated vortex wind field

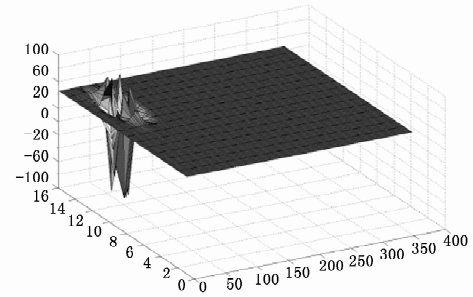


图7 模拟涡旋风场的风向角度

Fig.7 the wind angle of simulated vortex wind field

从反演出的风速大小和方向角度如图8和图9所示,与模拟风场进行比较,可以看出均匀风场区域反演很好,在涡旋区域能看出,反演的风速大小和方向角度有明显的起伏。而且反演的风速大小与实际模拟风速大小起伏内部结构也基本一致,数值稍有误差,最大误差为15%。而反演的方向角度与实际模拟风方向角度起伏内部结构误差较大,数值误差在20%左右。

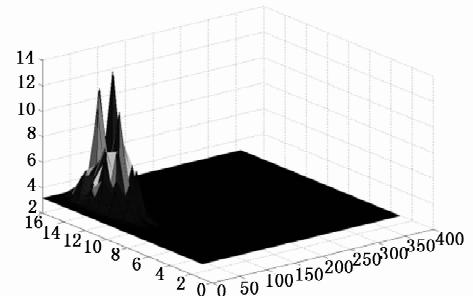


图8 反演涡旋风场的风速大小

Fig.8 the wind speed of retrieval vortex wind field

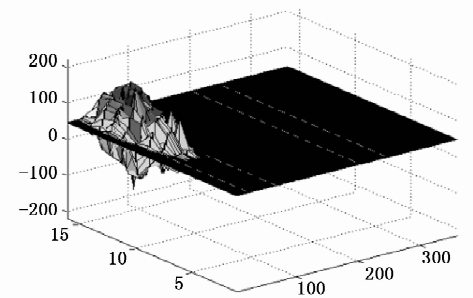


图9 反演涡旋风场的风向角度

Fig.9 the wind angle of retrieval vortex wind field

4 结论

在对均匀风场和均匀风场叠加涡旋场进行反演实验中,本文重点考虑以下因素并得到结论:

- (1)在反演中,建立低空小尺度风场模型,并采用几何方法对均匀风场和均匀风场叠加的涡旋风场进行实验。反演的均匀风场与模拟风场基本一致,可以反映出风场的细微结构;反演的涡旋风场虽稍

有误差,但也能正确反映出风场的变化趋势。

(2) 由于得到的径向风速为极坐标象点,在运算中需要进行平面坐标的变换,采用 3×3 邻域象点均值插值方法对漏点进行赋值。

(3) 几何分法反演出的风场大小和方向误差在可接受范围,风场大小最大误差为 15%,角度误差在 20% 以内。

(4) 由于本文所进行的实验使用的是理想的模拟数据,与真正的多普勒激光雷达数据还存在一定差距,时间激光雷达测得的数据不是均匀分布的,在后续工作中,可按照雷达实际数据模式对算法进行改进。

参考文献:

- [1] Jiang Lihui, Yan Pu, et al. Frequency tracking solution and achievement for Fabry-Perotetalon in wind lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 83 - 86. (in Chinese)
蒋立辉,闫朴,等. 测风激光雷达中 F-P 标准具频率跟踪方案及实现[J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 83 - 86.
- [2] Waldfel P, Corbin H. On the analysis of single-Doppler radar data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(3): 532.
- [3] Xu Shufang. The theory and method of matrix computations [M]. Beijing: Peking University Press, 1995. (in Chinese)
- 徐树方. 矩阵计算的理论与方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995.
- [4] Huang Duo, Chen Lanping, Wang Feng. Numerical analysis [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
黄铎, 陈兰平, 王凤. 数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] Feng Guochen, Yu Genpu. Introduction to matrix analysis [M] Changchun: Jilin University Press, 1991. (in Chinese)
冯果忱, 于庚蒲. 矩阵分析导论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1991.
- [6] Zhang Shaobo, Hu Mingbao, Zhang Peng. The use of precondition conjugate gradients method in the VVP 3D wind field retrieval [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2004, 24(3): 95 - 98. (in Chinese)
张少波, 胡明宝, 张鹏. 预处理共轭梯度法在 VVP 三维风场反演中的应用[J]. *气象科学*, 2004, 24(3): 95 - 98.
- [7] Ma Qingyun, Li Zechun, Tao Shiwei. Wind-field retrieval through single Doppler weather radar and its application to nwp [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2001, 12(4): 488. (in Chinese)
马清云, 李泽椿, 陶士伟. 单部多普勒天气雷达风场反演及其在数值预报中的应用试验[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(4): 488.