

文章编号: 1001-3806(2012)01-0022-04

## 机载测风激光雷达下视 VAD 反演及算法仿真

黄敏<sup>1</sup> 王玉兰<sup>1\*</sup> 王娜<sup>1</sup> 陈涌<sup>2</sup> 任鹏<sup>2</sup> 周鼎富<sup>2</sup> 史晓丁<sup>2</sup> 冯力天<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 管理科学学院 成都 610059; 2. 西南技术物理研究所 成都 610041)

**摘要:** 为了研究机载测风激光雷达对机下空域 3 维风场分布进行探测的问题, 基于陆基测风激光雷达建立风场模型, 采用 Levenber-Marquardt(LM) 最小二乘法优化径向速率, 与传统反演算法进行了仿真对比。结果表明, 机载测风激光雷达的工作原理和扫描方式与陆基测风激光雷达类似, 不同的是, 机载测风激光雷达不仅受飞机速度干扰, 而且存在飞机飞行状态不稳定性影响、地球曲率影响、地面强散射回波干扰、地面杂波干扰等特有误差来源, 使得风场反演难度更大; 而 LM 最小二乘法具有 Newton-Gaussian 最小二乘法的快速收敛特性和梯度下降法的保证收敛特性, 能满足风场快速和准确的反演。相关结果对测风激光雷达的优化具有参考价值。

**关键词:** 激光技术; 机载; 测风激光雷达; 速度方位显示技术; LM 最小二乘法

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.007

### Algorithm and simulation of downward velocity azimuth display of airborne wind lidars

HUANG Min<sup>1</sup>, WANG Yu-lan<sup>1</sup>, WANG Na<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, ZHOU Ding-fu<sup>2</sup>, SHI Xiao-ding<sup>2</sup>, FENG Li-tian<sup>2</sup>

(1. Management Science College, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study how to detect three-dimension wind field under an airplane, a model for wind field was built based on ground-based wind lidars, and the radial velocity was optimized by means of Levenber-Marquardt(LM) least square method. It was compared with the traditional algorithms. The working mechanism and scanning modes for airborne lidars are similar with ground-based lidars. On the contrary, it is more difficult to retrieve the wind field because of its own flying speed, instability of flight status, the curvature of the earth, the strong ground scattering echo and ground clutter; the LM least square method is able to converge rapidly and accurately because it has the advantages of fast convergence features of the Newton-Gaussian least square method and the ensuring convergence features of the gradient descent method. The results provide references for the optimization of lidars.

**Key words:** laser technique; airborne; wind lidar; velocity azimuth display technique; LM least square method

## 引言

机下空域的大气风场探测对运输机、轰炸机的精确投掷、紧急救援安全等方面具有十分重要的意义。国际民航组织、世界气象组织、各国航空航天研究机构正积极开展有关风场探测系统的研究。机载测风激光雷达是一种新型、高效的探测手段, 能对机下空域的实时风场进行快速遥感测量, 获得飞机下方各个高度空间层的实时风速风向参量, 在军用、民用、紧急救援等方面中具有非常广阔的应用前景。

与陆基测风激光雷达不同的是, 机载测风激光雷

达不仅要求对飞机进行动态全球定位系统(global positioning system, GPS) 定位及惯性导航系统(inertial navigation system, INS) 姿态和加速度的惯性测量, 将测量的结果精确地同步给系统, 以消除飞机速度对所测的多普勒频移的影响<sup>[1-3]</sup>, 而且存在飞机飞行状态的稳定性影响、地球球面曲率影响、地面强散射回波干扰和地面杂波干扰等一系列机载测风中特有的误差来源<sup>[4-5]</sup>, 使得径向风速曲线并不光滑, 反演难度加大。

因此, 选择一种更好的算法以最快的速率和最好的精度拟合出径向风速成为反演机下空域风场信息的关键。目前大部分风场反演算法选取经典最小二乘法、Newton-Gaussian 最小二乘法或梯度下降法, 但这几种传统算法都存在收敛速率或收敛精度上的不足, 很难达到实时反演的要求<sup>[6-9]</sup>。本文中采用的 Levenber-Marquardt(LM) 最小二乘法能动态地调整迭代的收敛

作者简介: 黄敏(1987-), 男, 硕士研究生, 现主要从事雷达算法优化、仿真及软件编写方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wyl@cduet.edu.cn

收稿日期: 2011-05-12; 收到修改稿日期: 2011-06-20

方向,减少迭代步骤,使得更快地收敛于最优解,能满足机载测风激光雷达对机下空域的大气风场的快速准确反演。

### 1 机载测风激光雷达下视 VAD 测风模型

#### 1.1 机载下视 VAD 光束扫描技术

与陆基测风激光雷达工作原理和扫描方式类似,机载测风激光雷达采用高重频窄线宽的脉冲激光束、脉冲外差相干探测工作模式及下视速度方位显示(velocity azimuth display, VAD)风场扫描方式(见图 1),系统向下发出激光束,通过对时间距离门的设置,将各个高度层的大气气溶胶颗粒后向散射的激光回波收集,并进行混频、叠加、鉴频等一系列处理,获得沿激光束方向的径向速度,同时配合光束圆锥扫描系统,实现风场的扫描,进而反演获得机下空域完整的 3 维风场分布<sup>[10-11]</sup>。

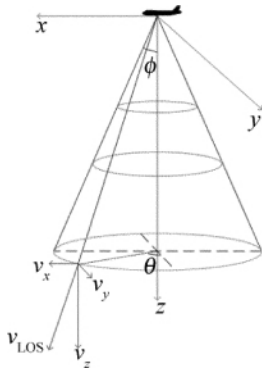


Fig. 1 Schematics of airborne downward velocity azimuth display

但与陆基测风激光雷达不同的是,机载测风激光雷达的圆锥扫描轨迹并不是标准的圆形,由于飞机速度的影响,扫描圈层的轨迹呈螺旋前进形状。这里考虑一般情况,飞机匀速平稳飞行,无航向角、侧滚角和倾斜角,不考虑地球曲率影响,且机下风场属于均匀风场。又考虑到飞行速度对机载测风的误差影响,飞机实施测风作业时需尽量降低飞行速率,可假设飞行速率为 80m/s,飞行高度为 5km,以 15°为天底角进行圆锥扫描,扫描 1 周时间为 1s,则在 2km 高度和地面处的光束扫描轨迹如图 2 所示。

由图 2 可知,光束扫描 1 圈所测区域并非是完整的闭合圆形,而是存在 80m 的偏差,形如 γ 形状的螺旋形,整个光束扫描的轨迹就有很多形如 γ 形状的螺旋形组成一组螺旋线圈。所以为了满足 VAD 反演条件,可假定一个形如 γ 的圈内风场均匀,这样即可与陆基 VAD 方法类似地建立风场模型并反演风场。值得注意的是,由于通过气溶胶散射回波所得多普勒频移有很大一部分是由飞机速度造成,因此在建立风场反演模型时要去除飞机速度对多普勒频移的影响,而

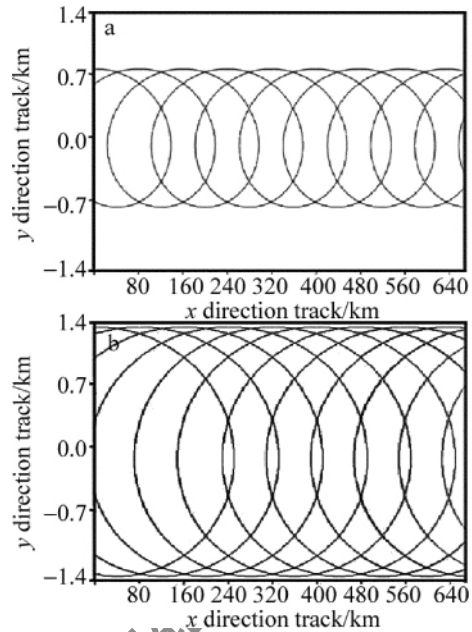


Fig. 2 VAD scanning track at height of 2km and on the ground

飞机速度一般比风速高一个数量级,使得机载测风对风场均匀性、稳定性的要求要比陆基测风更高,反演难度更大。

#### 1.2 建立风场反演模型

由上面的假设条件建立机下空域风场模型。如图 1 所示,考虑载体垂直坐标系,以机身纵轴向前为 x 轴正方向, y 轴垂直于 x 轴并以向左为正方, z 轴垂直于飞机平面并以向下为正方向,设定飞机速率为  $v_p$ ,天底扫描角为  $\phi$ ,扫描方位角为  $\theta$ ,风速为  $v_w = (v_x, v_y, v_z)$ 。其中  $v_x, v_y, v_z$  分别为风速在 x 轴、y 轴、z 轴的分量。

由几何关系有:

$$v_{LOS} = (v_x + v_p) \cos\theta \cos\phi + v_y \sin\theta \cos\phi + v_z \sin\phi \quad (1)$$

式中  $v_{LOS}$  为径向速率。

由三角函数关系变换得:

$$v_{LOS} = a \cos(\theta - b) + c \quad (2)$$

式中,  $a = \sqrt{(v_x + v_p)^2 + v_y^2} \cos\phi$ ,  $b = \arctan \frac{v_y}{v_x + v_p}$ ,  $c = v_z \sin\phi$ 。

由(2)式可知,同一圈层的径向风速  $v_{LOS}$  在理想情况下为标准的余弦函数,那么通过所测得的径向风速数据可以拟合得到一条形如图 3 的余弦曲线。

由图 3 可求出自变量系数  $a, b, c$  的值,进而得到风速:

$$v_w = \begin{pmatrix} a \\ \cos\phi \sqrt{1 + \tan^2 b} - v_p \\ \operatorname{atan} b \\ \cos\phi \sqrt{1 + \tan^2 b} \sin\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ v_p \\ c \\ c \sin\phi \end{pmatrix} \quad (3)$$

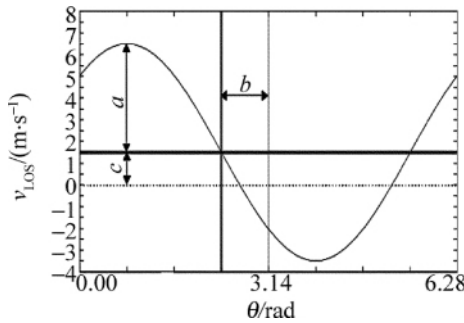


Fig. 3 Cosine curve of line-of-sight velocity

由此可以知道该圈层的风场数据,进而反演出整个机下空域的3维风场。

至此,已经建立了机载测风激光雷达下视VAD测风模型。不过在实际测量中,机载测风激光雷达除了存在仪器误差、扫描圈内风场不均匀性、小幅值风速影响及奇异点的影响等与陆基VAD扫描方法相似的误差来源之外,还存在一些其它不同误差来源:飞机的自身飞行状态(航向角、侧滚角及倾斜角)的不稳定性;地球球面曲率对假设的垂直坐标系的影响;强烈的地面反射回波容易导致探测器或放大器的饱和;地面辐射源高低起伏造成的杂波干扰。针对以上误差,除了通过光学系统和信号处理单元进行控制外,采用一种数值优化算法对径向风速反演时进行及时修正能行之有效的控制反演速率和测量精度。

## 2 LM最小二乘法的数值求解

传统风场反演时一般采用经典最小二乘法、Newton-Gaussian最小二乘法或梯度下降法,但它们在收敛时存在不同方面的不稳定性,因此作者采用LM最小二乘法拟合余弦函数  $f(\theta, P) = a \cdot \cos(\theta - b) + c$ ,其中  $\theta$  对应于扫描方位角,  $P = (a, b, c) \in R^3$ ,即可求出最佳的拟合值  $P = (a, b, c)$ ,并反演出3维风场。

根据最小二乘法的性质定义,令:

$$r_i(P) = v_i - f(\theta_i, P) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

为残量函数  $r(P): R^3 \rightarrow R^m$  的分量,其中  $v_i$  为径向速度  $v_{LOS}$  的分量。最小二乘法的关键是要使得所有残量的平方和最小,即可转化为误差目标函数:

$$\phi(P) = \sum_{i=0}^m [v_i - f(\theta_i, P)]^2 = \sum_{i=0}^m r_i^2(P) = \|r_i(P)\|_2^2 \quad (5)$$

的最小化问题,即找到最优解  $P^*$  使得  $\phi(P)$  值最小,根据极值必要条件,最优解  $P = P^*$  应满足  $\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{P=P^*} = 0$ ,即:

$$J^T(P^*) r(P^*) = 0 \quad (6)$$

式中雅克比矩阵为:

$$J(P^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(P^*)}{\partial a} & \frac{\partial r_1(P^*)}{\partial b} & \frac{\partial r_1(P^*)}{\partial c} \\ \frac{\partial r_2(P^*)}{\partial a} & \frac{\partial r_2(P^*)}{\partial b} & \frac{\partial r_2(P^*)}{\partial c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_m(P^*)}{\partial a} & \frac{\partial r_m(P^*)}{\partial b} & \frac{\partial r_m(P^*)}{\partial c} \end{bmatrix}, \text{但精确}$$

值  $P^*$  此时并未算出,因此,利用泰勒公式把  $J^T(P)$  和  $r(P)$  在初值  $P = P^*$  附近展开,由此计算出  $J^T(P)$  和  $r(P)$  处的值,此时方程组就可化为线性方程组逐步以  $S_k$  (其中迭代次数  $k = 0, 1, 2, \dots$ ) 为步长迭代求解,迭代方程和法方程分别如下:

$$P_{k+1} = P_k + S_k \quad (7)$$

$$J^T(P_k) J(P_k) S_k = -J^T(P_k) r(P_k) \quad (8)$$

(7)式、(8)式即为Newton-Gaussian最小二乘法的迭代步骤,但在解方程式(8)时,常出现矩阵  $J^T(P_k) J(P_k)$  性质不好的情况,以致无法继续迭代,为了改善矩阵  $J^T(P_k) J(P_k)$  的性质,适当加大矩阵的主对角线元素,即进行正则化处理,经过处理后的法方程为:

$$[J^T(P_k) J(P_k) + \mu_k I] S_k = -J^T(P_k) r(P_k) \quad (9)$$

式中  $\mu_k$  为阻尼因子,  $I$  为单位矩阵,则LM最小二乘法求最优解  $P^*$  的迭代方程为:

$$P_{k+1} = P_k - [J^T(P_k) J(P_k) + \mu_k I]^{-1} \times J^T(P_k) r(P_k) \quad (10)$$

根据(10)式即可逐步迭代收敛。

## 3 仿真及算法对比

### 3.1 LM最小二乘法数值模拟

假设某一圈层的风速  $v_w = (10\text{m/s}, 10\text{m/s}, 4\text{m/s})$ ,由前面的假设条件可以得到径向速率的理论系数  $P = (90.5539, 0.4636, 1.353)$ 。将  $P$  在  $\theta \in [0, 2\pi]$  中分成100组,并加入随机噪声获得模拟的初始雷达数据  $(\theta_i, v_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, 100$ )。然后利用最小二乘法对这组模拟数据按照流程图(见图4)进行最佳拟合,其中给定  $P$  的初值  $P_0 = (100, 1, 1)$ ,初始阻尼因子  $\mu_0 = 1$ ,并设定  $\varepsilon_1 = 0.001$ ,  $\varepsilon_2 = 0.001$ ,  $T = 100$ ,  $H = 10$  (其中,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别是误差目标函数和阻尼因子的误差限,  $T$  是最大迭代次数,  $H$  是阻尼因子控制系数)。经过迭代得到最优解  $P^* = (89.9427, 0.4672, 0.9626)$ ,均方误差为0.6155。最后,将理论数据、加入噪声的模拟数据和迭代后的拟合数据进行比较,结果见图5,图中横坐标是扫描方位角,纵坐标是径向速率值,实心点、空心圈和实线分别对应理论数据、加入噪声的模拟数据和迭代后的拟合数据。可以看出由  $P^*$  拟合的余弦曲线

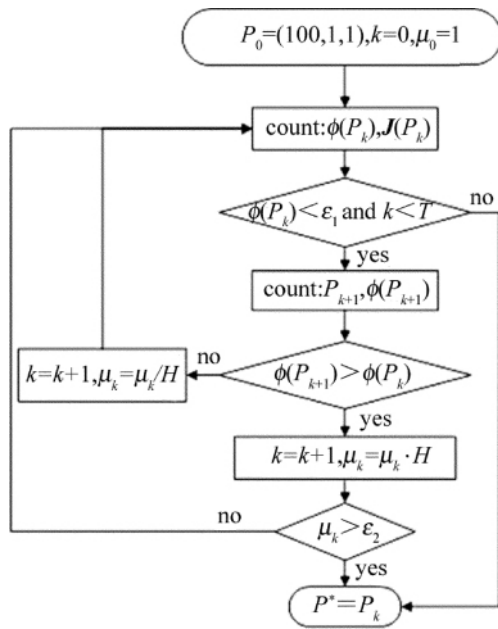


Fig. 4 The flow chart of LM least square

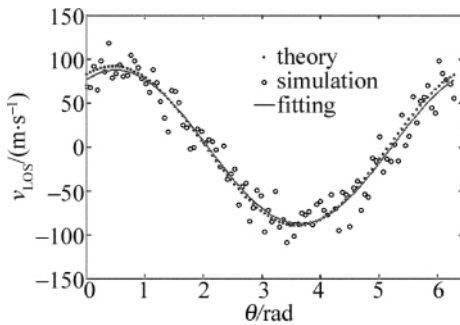


Fig. 5 Theory, simulation and iterative fitting of the data comparison  
能很好地反映模拟的初始数据 而且与理论值十分吻合。

### 3.2 LM 最小二乘法和传统拟合算法对比

下面将传统反演方法与 LM 最小二乘法进行比较。初值与上述相同,然后分别用 Newton-Gaussian 最小二乘法、梯度下降法及 LM 最小二乘法进行迭代求解。表 1 中列出了 3 种算法的最优解及均方误差,图 6 中画出了 3 种算法每次迭代的误差值(其中横坐标为迭代次数 纵坐标为每次迭代的均方误差)。

Table 1 Optimal solution and iterative error

	optimal solution( $P^*$ )	mean square error
Newton-Gaussian	( 120.0975 0.4722 1.000 )	17.0570
gradient	( 90.0066 0.4561 0.2069 )	0.5732
LM	( 90.0005 0.4670 1.0103 )	0.3198

从表 1 可以看出,Newton-Gaussian 法收敛误差很大 这是由于雅克比矩阵不满秩导致最终算法失效;由图 6 可知 梯度法虽然最终收敛且误差较小,但迭代次数较多;而 LM 法迭代 5 次以后就能稳定地取得很好的精确解,在收敛速率和收敛精度上有很大优势。并且从迭代的最初几步中能看出,LM 最小二乘法能够根据迭代的结果动态地调整迭代的收敛方向,可使每次的迭代误差值都有所下降,这也恰恰是 LM 最小二

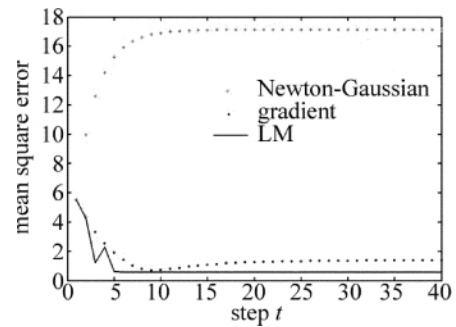


Fig. 6 Iterative error each step

乘法优于传统算法的独特之处。

### 3.3 LM 最小二乘法对初值的依赖性

分别针对初值  $P = (a, b, c)$  选取 5 组不同初始系数进行 LM 最小二乘法迭代,以检验初值对 LM 最小二乘法的重要性。结果如表 2 所示。

Table 2 Comparison results of 5 different initial groups

group	initial $P_0$	optimal solution( $P^*$ )	converge- nce time	mean squ- are error
1	( 100 1 1 )	( 89.8679 0.4825 1.3608 )	0.0459	0.4385
2	( 1 1 1 )	( 91.2426 0.5219 1.61184 )	0.0784	0.5221
3	( 100 10 1 )	( -91.1132 0.8741 1.1848 )	0.1545	105.0262
4	( 100 1 10 )	( 91.6504 0.4824 1.7340 )	0.0438	0.7507
5	( 1 10 10 )	( -92.4825 0.8595 3.5409 )	0.2434	105.8251

表 2 中,第 1 组初值  $(a, b, c)$  的选取都靠近目标值,有很好的收敛速率和收敛精度;第 2 组和第 4 组虽选取的  $a$  和  $c$  的值较远离目标值,但也有较好的收敛速率和收敛精度;第 3 组和第 5 组选取  $b$  的值较目标值较远,收敛速率较慢,且陷入了局部最优解,误差较大。从第 1 组和后 4 组比较可知,初始系数的选取对收敛结果有影响;从后 4 组比较可知,初始系数中对结果影响最大的是  $b$  的初值。综上可知,如果初值(尤其是系数  $b$ )离最优解较远则收敛速率较慢,在一定的时间和迭代次数下得达不到收敛精度要求,甚至收敛不到最优解。

## 4 结 论

针对机载测风激光雷达存在的误差来源,本文中采用 LM 最小二乘法对风场的径向速率进行优化,并与 Newton-Gaussian 最小二乘法和梯度下降法进行比较,仿真结果表明,LM 最小二乘法能够根据迭代的结果通过动态地调整阻尼因子以动态地调整迭代的收敛方向,可使每次的迭代误差值都有所下降,可见 LM 最小二乘法是 Newton-Gaussian 最小二乘法和梯度下降法的结合,同时具有 Newton-Gaussian 最小二乘法的快速收敛特性和梯度下降法的保证收敛特性,能满足风

(下转第 41 页)

“平差效应”特性保证光栅短周期误差对莫尔条纹计量精度不会造成太大影响;光栅长周期不匀误差会导致莫尔条纹波形的严重畸变,给信号检测和处理带来系统误差,甚至导致无法读取信号波形,因此,需要尽量避免带有长周期误差的光栅出现在检测系统中。

作者提出的光栅误差分析方法也可以运用到对光栅传感器的振动、码盘偏心等误差的分析研究中<sup>[9]</sup>,所提到的方法和结论对光栅传感器制造和应用以及莫尔计量理论研究具有参考价值。

#### 参 考 文 献

- [1] GAMET E, JOURLIN Y, REYNAUD S, *et al.* Continuous writing technique of long gratings for metrological applications[J]. *Proceedings of SPIE* 2006 6188: 618808/1-618808/6.
- [2] JING G, YE J. The error analysis about the grating length sensor[J]. *Journal of Qingdao University*, 1996, 11(12): 24-28 (in Chinese).
- [3] ZHU Y Sh, YANG J T. Study of Moiré fringe signals with high accuracy

and superior quality in radial gratings[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 16(4): 280-285 (in Chinese).

- [4] MORIMOTO Y, SEGUCHI Y, DAIFUKU K. Fourier-transform Moiré method with consideration of misalignment[J]. *Experimental Mechanics*, 1994, 34(12): 350-351.
- [5] ZHU X L, CHEN J N. Modeling of Moiré patterns based on Ronchi grating[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(1): 12-15 (in Chinese).
- [6] CAO X Q, HUANG W Sh, JIN T. Grating measuring technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992: 158-229 (in Chinese).
- [7] SCIAMMARELLA C A, STURGEON D L. Digital-filtering techniques applied to the interpolation of Moiré-fringes data[J]. *Experimental Mechanics*, 1967, 7(11): 468-475.
- [8] YE Sh X. Photoelectric displacement precision measuring technology [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003: 89-126 (in Chinese).
- [9] HUANG T, HU Y H. Simulation and modeling of lidar waveforms returned from obscure targets[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1): 11-14 (in Chinese).

(上接第25页)

场的快速和准确反演。不过 LM 最小二乘法对于初值的选择比较挑剔,因此为避免陷入局部最小解,可先使用全局搜索算法确定其初始搜索区域,再利用 LM 最小二乘法快速收敛于最优解,以使算法的鲁棒性更强。

#### 参 考 文 献

- [1] LAI D, CHEN Y, ZHOU D F, *et al.* Beam scanning of lidar and the simulation of the improved VAD inversion methods[J]. *Laser Technology* 2008, 32(6): 584-586 (in Chinese).
- [2] WANG B X, SHEN F H, SUN D S, *et al.* Beam scanning and wind field measurement of direct-detection Doppler lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering* 2007, 36(1): 69-72 (in Chinese).
- [3] REN P, WANG Y L, KANG D Y, *et al.* Numerical optimization in VAD inversion technique for wind lidar[J]. *Laser Technology* 2009, 33(6): 664-666 (in Chinese).
- [4] WANG X Q, DONG Y Q, YUAN Sh, *et al.* Study on simulation of micro-Doppler effect in lidar[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 117-119 (in Chinese).
- [5] SAMMY W H, STEPHEN M H. Advanced coherent lidar system for wind measurements[J]. *Proceedings of SPIE* 2005 5887: 588-601.

[6] EMMETT G D, HANDLEY C. Airborne Doppler lidar surface returns, data products other than tropospheric winds[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003 4893: 319-326.

- [7] WAN R, TANG D Z, ZHANG P, *et al.* Velocity azimuth display elementary analysis of nonlinear wind field[J]. *Scientia Meteorologica Sinica* 2003, 23(3): 314-324 (in Chinese).
- [8] SARA C T, BREWER W A, ROBERT M B. Doppler lidar estimation of mixing height using turbulence, shear, and aerosol profiles[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 26(2): 673-688.
- [9] XU Q Y, NING H Sh, CHEN W Sh, *et al.* Applications of meteorological radar for the civil aviation safety[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 2147-2151 (in Chinese).
- [10] WEISSMANN M, BRAUN F J, GANTNER L, *et al.* The alpine mountain-plain circulation: airborne Doppler lidar measurements and numerical simulations[J]. *American Meteorological Society*, 2005, 12(11): 3095-3109.
- [11] LI D M, ZHENG Y Ch, PAN J Y, *et al.* Index system of coherence Doppler wind lidar[J]. *Optical Technique* 2010, 36(6): 880-884 (in Chinese).