

扫描式测风激光雷达的风场反演

李 丽*, 王灿召, 谢亚峰, 董光焰

(中国电子科技集团公司 第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要:为了解决扫描式测风激光雷达斜上方空域三维风场分布探测的难题,提出采用多点规则采集、四波束分组结算、多区域融和的方式进行观测区域的风场反演。以速度可控的硬目标作为研究对象,通过比较合成后的风速大小与控制速度的差异验证了该反演方式的有效性。通过设计精度试验,对实际风场进行测量。对雷达测量结果与三维超声波风速风向仪测量数据进行对比,结果表明:采用该风场反演技术对距离400 m内的风场进行推算,风向精度优于 5° ,风速精度优于2 m/s,能够准确描绘探测区域的风场信息。

关键词:扫描式测风激光雷达;风场反演;风场分布;四波束

中图分类号:TN958.98 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20130602.0251

Wind field inversion technique for scanning wind lidar

LI Li*, WANG Can-zhao, XIE Ya-feng, DONG Guang-yan

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

* Corresponding author, E-mail: lldeemail@163.com

Abstract: In order to solve the difficulty of detecting three-dimension wind field oblique upper of a scanning wind lidar, a method of wind field inversion was provided based on multi-point regular acquiring, four-beam packet calculating and multi-area merging. To verify the validity of this method, a target with controllable velocity was studied and synthetic velocity was compared with the velocity in control. The result indicates that the method is feasible and effective. The accuracy test was designed to calculate the actual wind field within 400 m. Measurement data from lidar were compared with that from three-axis anemometer. The results indicate that the wind direction accuracy is better than 5° , and the wind speed accuracy is better than 2 m/s, which is enough to describe the wind field of detecting area accurately.

Key words: scanning wind lidar; wind field inversion; wind field distribution; four beams

1 引言

测风激光雷达可以通过测量气溶胶和分子散射回波信号得到大气风场的参数^[1],具有测量精度高、不影响目标运动、信号稳定、非接触等优点,而快速、准确探测风场变化,可为飞行导航等提供安全保障。在激光雷达的风场测量中,采用3个独立的激光雷达系统对同一大气范围进行测量,尽管从理论上讲可以精确地得到3个分量值,但是具体实现有难度,尤其是扫描同步^[2-4]。目前多是利用单一的激光雷达系统,通过扫描技术,采集全部扫描过程中的径向风速、角度、距离数据,最后由一些假定反演出三维风场结构^[5-6]。

为实现斜上方空域三维风场分布的探测,扫描式测风激光雷达的工作重点是利用扫描过程中的数据反演三维风场。20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做全方位锥形扫描,探测激光散射回波信号,可以获得不同高度层上的水平平均风速和风向,但由于不能获得风速的垂直分量而无法直接用于斜上方空域三维风场的测量。针对上述问题,结合目前正在研制的测风激光雷达系统,作者提出采用多点规则采集、四波束分组结算、多区域融合的方式进行观测区域的风场反演。首先采用双振镜扫描的方式对观测区域进行采样,获取采样点的相对位置以及径向风速信息。然后,将采样点进行分组,按照四波束合成法计算各组合成风速^[7-8]。最后,进行多区域融合,实现观测区域的风场反演。

为了验证该方法的有效性^[9-10],首先以速度可控的硬目标作为研究对象,通过雷达系统测量硬目标四点径向多普勒信号,计算出径向速度,然后将各分量根据四波束方式进行合成,比较合成后的风速大小与控制速度的差异。然后,采用该方法对观测区域进行风场测量,将测量结果与三维超声波风速风向仪的测量数据进行对比。结果表明,采用该风场反演技术对距离400 m内的风场进行推算,风向精度优于 5° ,风速精度优

于2 m/s,能够准确描绘探测区域的风场信息。

2 风场反演技术

2.1 多点规则采集

由于激光光束发散角较小,在进行较大范围内风场测量时,激光光束不可能完全覆盖所有的探测空域,要实现全部待测空域的探测,必须进行一定范围的扫描。扫描范围与探测空域有关,扫描步距与系统要求的精细度及反应速度有关,通过对全部待测空域各采样点径向风速的测量,实现各扫描步距方向风场的探测,进而实现全部探测空域风场的测量。激光束扫描过程中,在某距离球面上选取一系列规则分布的采样点,如图1所示。

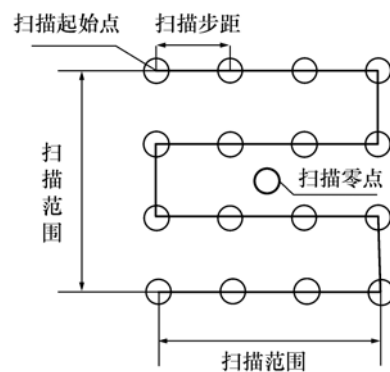


图1 扫描采样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scanning and sampling

测量各采样点的径向风速:激光雷达以某一位置为起始点发射激光脉冲,发射光学系统将脉冲激光投射向该位置的大气目标空间。由于大气中存在气溶胶粒子,大气中的悬浮颗粒将会对激光束产生散射,根据悬浮颗粒的运动特性,散射光会叠加一个多普勒频移,多普勒频移的大小与悬浮颗粒的径向运动速度有关^[11]。激光雷达光学系统将收集到大气中悬浮粒子的散射回波信号与本振光在回波光电探测器光敏面发生混频效应,输出两束光的差频信号,该差频信号通过滤波及放大后送往信息处理单元,信息处理系统通过检

测该差频信号,计算出风场的径向速度;激光雷达通过检测发射信号与回波信号的时间差,确定目标的距离。信息处理系统则通过对不同距离风速的测量,实现探测范围内各距离段上的径向风速测量,图 2 为径向风速测量示意图。

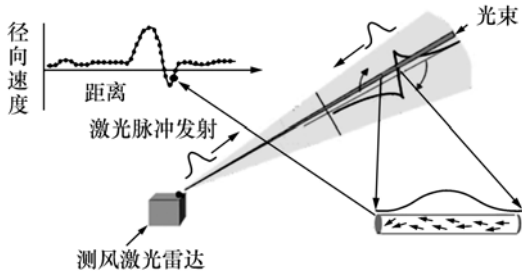


图 2 径向风速测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of radial velocity measuring

2.2 四波束分组结算

针对扫描过程中的采样点,按照距离段进行分组,每组由同一距离球面上的 4 个相邻采样点组成,如图 3 所示。根据数学原理只需 3 个点就可以确定一个空间矢量,但考虑到四点的对称性易于计算,故采用 4 个采样点为一组。

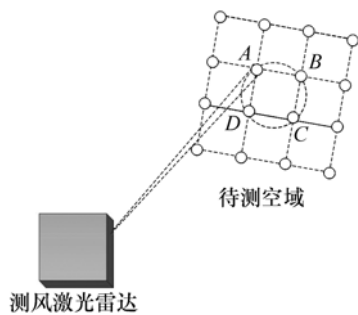


图 3 采样点分组示意图

Fig.3 Schematic diagram of grouping of sampling points

图中, A, B, C, D 为相邻四点,组成正方形形状,同时,激光雷达到 A, B, C, D 四点的径向矢量大小相等且处于同一圆锥的截面上。 $ABCD$ 区域的风场风速矢量解算如图 4 所示。

图 4 中, AB 和 CD 都平行于地面,扫描圆锥角为 2α ,圆锥中轴线与地面的夹角为俯仰角 β 。在光束扫描圆锥界面上建立如图 5 所示的观测坐

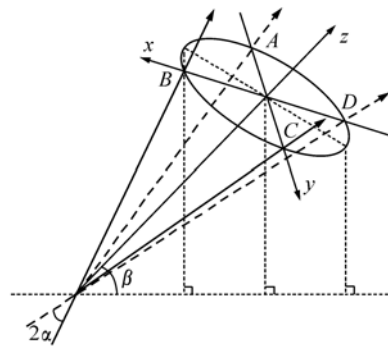


图 4 风速矢量解算示意图

Fig.4 Schematic diagram of calculating wind velocity vector

标系。设 A, B, C, D 处的风场径向速度矢量 v_A, v_B, v_C, v_D 正方向指向激光出射点,并且假设 $ABCD$ 区域内的风场是均匀的。

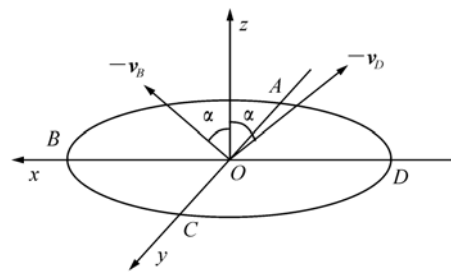


图 5 扫描观测坐标系

Fig.5 Diagram of scanning observation coordinate system

可以推算出在扫描观测坐标系下 $ABCD$ 区域内风场的群速度矢量分量 (v_x, v_y, v_z) :

$$\begin{cases} v_x = \frac{(v_D - v_B)}{2\sin\alpha} \\ v_y = \frac{(v_A - v_C)}{2\sin\alpha} \\ v_z = -\frac{(v_A + v_B + v_C + v_D)}{4\cos\alpha} \end{cases}, \quad (1)$$

在光束扫描圆锥截面上建立的观测坐标系中求得观测视场中风场的群速度矢量分量后,需要将其转换至雷达坐标系。由图 6 可以看出,将 xyz 坐标系绕 z 轴顺时针旋转 45° ,变换至坐标系 $x'y'z'$,此时, y' 轴平行于底面,可得:

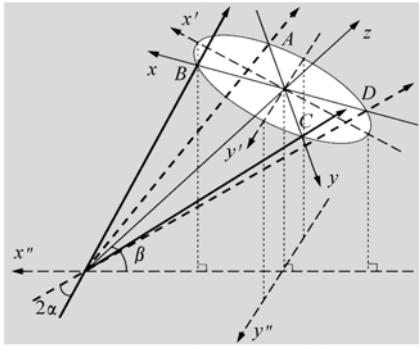


图6 观测坐标系与地面坐标系关系图

Fig.6 Diagrams of observation coordinate and ground coordinate

$$\begin{cases} v_{x'} = \frac{\sqrt{2}(v_C + v_D - v_A - v_B)}{4\sin\alpha} \\ v_{y'} = \frac{\sqrt{2}(v_A + v_D - v_B - v_C)}{4\sin\alpha} \\ v_{z'} = -\frac{(v_A + v_B + v_C + v_D)}{4\cos\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

然后,将 $x'y'z'$ 轴逆时针旋转 $90^\circ - \beta$, 可变换至雷达坐标系 $x''y''z''$:

$$\begin{cases} v_{x''} = \frac{\sqrt{2}(v_C + v_D - v_A - v_B)}{4\sin\alpha} \sin\beta + \frac{(v_A + v_B + v_C + v_D)}{4\cos\alpha} \cos\beta \\ v_{y''} = \frac{\sqrt{2}(v_A + v_D - v_B - v_C)}{4\sin\alpha} \\ v_{z''} = \frac{\sqrt{2}(v_C + v_D - v_A - v_B)}{4\sin\alpha} \cos\beta - \frac{(v_A + v_B + v_C + v_D)}{4\cos\alpha} \sin\beta \end{cases} \quad (3)$$

2.3 多区域融合

针对不同的采样区域可以在各自相应的雷达坐标系下推算出对应区域的风场群速度矢量。将各采样区域的风场群速度矢量转换到同一地面观测坐标系下,即可获得探测区域的风场结构信息。图7为多采样区域风速融合解算。

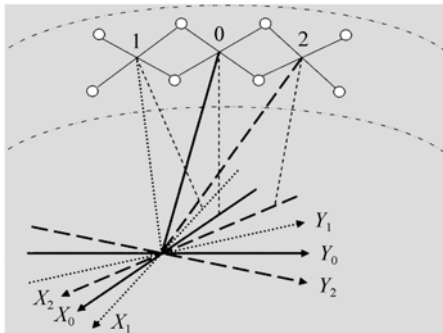


图7 多采样区域风速的融合解算示意图

Fig.7 Schematic diagram of fusion solver of wind velocity in different sampling areas

如图7所示,设点0在 $X_0Y_0Z_0$ 坐标系下的风速为 $[v_{x_0} v_{y_0} v_{z_0}]'$, 点1在 $X_1Y_1Z_1$ 坐标系下的风速为 $[v_{x_1} v_{y_1} v_{z_1}]'$, 点2在 $X_2Y_2Z_2$ 坐标系下的风速为

$[v_{x_2} v_{y_2} v_{z_2}]'$, 点1和点2相对于点0的方位角为 θ , 以 $X_0Y_0Z_0$ 坐标系为总的地面观测坐标系, 则点1和点2在该坐标系下的风速为:

$$\begin{bmatrix} v_{x_{10}} \\ v_{y_{10}} \\ v_{z_{10}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ v_{z_1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} v_{x_{20}} \\ v_{y_{20}} \\ v_{z_{20}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x_2} \\ v_{y_2} \\ v_{z_2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3 试验方法与结果

3.1 算法验证

采用多自由度轨道运动系统进行算法验证,如图8所示。在转台上设置固定目标,目标具有一定的高度且在转台滑动的过程中认为整个目标具有相同的运动速度。通过多自由度轨道运动系统控制目标的运动速度,以获取不同的速度分量。为了减小脉冲探测体制对试验测量误差的影响以及考虑设备调节的方便性,采用连续体制的激光系统对目标进行测量。由于连续体制系统探测

时,目标反射回波的多普勒处理中受时间的影响很小,快速傅里叶变换(FFT)变换时点数可以足够多,多普勒信号也足够精确。

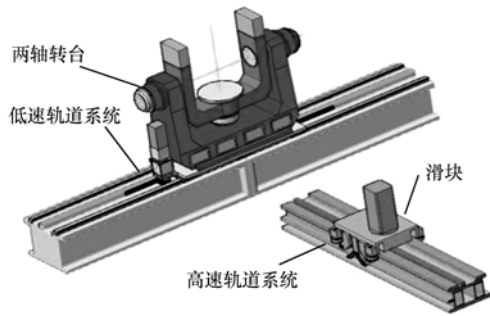


图8 多自由度轨道运动系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of orbit motion system with multiple degrees of freedom

试验的测量模式如图9所示。通过雷达系统对A、B、C、D 4点径向多普勒信号的测量,计算出径向速度,然后将各分量根据四波束方式进行合成,比较合成后的风速大小与滑轨控制速度的差异,

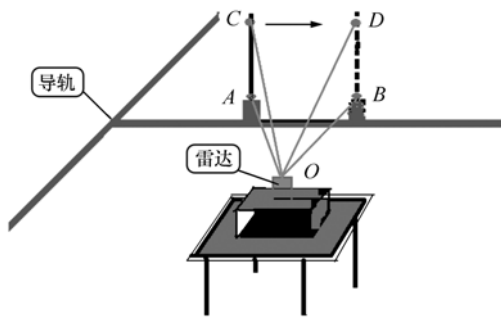


图9 验证方案示意图

Fig.9 Schematic diagram of verified experiment

从而验证反演方式的有效性和正确性。试验时选取两种不同的运动速度进行反演情况的解算。

激光雷达瞄准A点,当目标匀速运动到AC位置时,获得了A点的切向速度,然后雷达调节仰角至C点位置,目标以同样速度运动至AC位置时,获取到C点的切向速度。同样方式获取到B点和D点的切向速度,精确测量A、B、C、D与雷达之间的位置关系以及距离角度关系后,通过四波束法推算运动目标的速度和目标的运动方向,并与实际控制速度的大小和方向进行比较。

首先确定A点高度,将激光雷达放置于光学调节平台上,调整激光雷达设备的高度,使激光雷达发射机的窗口高度与A点等高。同时,选取合适的目标,使 $AB = BD = CD = AC = 1.4\text{ m}$,调整滑块的角度,同时用手持测距机测定激光雷达距测量点的距离,使 $OA = OC = OB = OD$ 。发射激光,控制滑块以某一恒定速度同目标测试区域,并记录下通过目标区域时的多普勒频移量,同时记录滑块的控制速度,完成后,开始下一运动速度的测量,最后计算滑块的合成速度,并将计算值与控制速度值相比较。试验的相关几何尺度如表1所示,试验的测量结果如表2所示。

表1 几何尺度

Tab.1 Geometric dimensions

序号	名称	尺度
1	A点高度	20 cm
2	雷达高度	20 cm
3	$OA = OC = OB = OD$	4 m
4	$\angle AOC$	20°
5	圆锥半角 α	14°
6	雷达俯仰 β	10°

表2 反演方式测试数据

Tab.2 Test data by inversion way

控制速度	参数	A	B	C	D
1 m/s	频率值	250 kHz	-255 kHz	-220 kHz	200 kHz
	速度值	0.187 5	-0.191 25	-0.165	0.15
4 m/s	频率值	1.02 MHz	-1.05 MHz	-885 kHz	810 kHz
	速度值	0.765	0.787 5	0.66	0.6

将A、B、C、D四点的测量结果代入式(3)可求得控制速度为1 m/s时,目标的速度为1.013 4 m/s;控制速度为4 m/s时,目标的速度为4.108 3 m/s。相对误差分别为1.34%和2.71%。

上述试验验证表明,四波束反演方式能够很好地解算出目标的真实速度,验证了四波束反演算法是可行且有效的。

3.2 精度测试

本试验通过对雷达测量数据与三维超声风速风向仪测量数据的比较来验证经反演得出的合成风速风向的测量精度和可靠性。试验用超声风速仪为英国Gill公司生产的Wind Master pro三维超声风速风向仪,主要参数如表3所示。

表3 超声风速风向仪参数

Tab.3 Parameters of three axis anemometer

技术参数	参量	备注
风速	0 ~ 65 m/s	
风速分辨率	0.01 m/s	
风速精度	1.5% RMS	12 m/s 速度时
风向	0 ~ 359.9°	
风向分辨率	0.1°	
风向精度	0.5°	特殊要求
数据刷新率	1/2/4/8 Hz	

三维超声风速风向仪产品外形如图10所示。

如图11所示,在相对空旷的场所树立标杆,将风速风向仪安装到标杆某高度处。调整激光雷达方位使其测量范围覆盖风速风向仪空域;分别



图10 三维超声风速风向仪

Fig.10 Three-axis anemometer

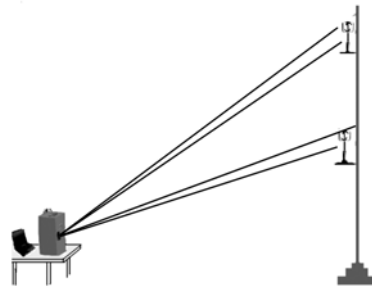


图11 风速风向标定场景示意图

Fig.11 Schematic diagram of wind velocity and wind direction demarcating

用激光雷达和风速风向仪测出同一时间段,同一空域内的风速风向值,并进行比对。通过调节风速风向仪的安装高度和激光雷达与标杆之间的距离获得不同测量值。试验中测量的部分平均数据见表4。

表4 风速风向测量数据

Tab.4 Results of wind velocity and wind direction

序号	激光雷达 距标杆距离/m	相对高度/m	风向仪 风速及风向	雷达 风速及风向	偏差
1	80	5	10.2 m/s 162.0°	9.7 m/s 165.1°	0.5 m/s -3.1°
2	80	10	10.7 m/s 166.2°	11.0 m/s 162.3°	-0.3 m/s 3.9°
3	80	14	11.5 m/s 167.2°	11.2 m/s 164.0°	0.3 m/s 3.2°
4	150	5	9.6 m/s 152.1°	9.9 m/s 154.3°	-0.3 m/s -2.2°

Table continued

序号	激光雷达 距标杆距离/m	相对高度/m	风向仪 风速及风向	雷达 风速及风向	偏差
5	150	10	10.1 m/s 155.1°	10.5 m/s 157.6°	-0.4 m/s -2.5°
6	150	14	11.4 m/s 162.0°	11.0 m/s 158.5°	0.4 m/s 3.5°
7	200	5	9.7 m/s 164.3°	10.2 m/s 163.0°	-0.5 m/s 1.3°
8	200	10	11.2 m/s 165.8°	10.7 m/s 162.2°	-0.5 m/s 3.6°
9	200	14	11.8 m/s 162.2°	11.5 m/s 164.7°	0.3 m/s -2.5°
10	350	5	11.3 m/s 170.0°	11.9 m/s 173.0°	-0.6 m/s -3.0°
11	350	10	11.8 m/s 152.2°	11.0 m/s 154.5°	0.8 m/s -2.3°
12	350	14	12.1 m/s 165.0°	11.7 m/s 163.9°	0.4 m/s 1.1°

通过对比、分析各组试验数据,发现测风激光雷达与超声波风速风向仪在同一时刻同一风域内测出的风速偏差为 $-0.6 \sim 0.8$ m/s,优于2 m/s;风向偏差为 $-3.1^\circ \sim 3.9^\circ$,优于 5° ,经上述反演算法得出的风速风向精度能够满足系统使用要求。

4 结 论

针对扫描式测风激光雷达斜上方空域三维风场分布探测的难题,创造性地采用多点规则采集、

四波束分组结算、多区域融合的方式进行观测区域的风场反演。给出了采用该方法反演三维矢量风场的一般公式,解决了测量坐标系与地面坐标系不一致造成的风场反演困难。通过多自由度轨道运动系统试验验证了该反演算法是可行且有效的。通过精度试验针对400 m内的风场进行了反演推算,将反演后的风场数据与超声风速仪测量数据进行对比显示:风速精度优于2 m/s,风向精度优于 5° ,表明该反演算法能够满足系统准确探测特定区域风场信息的要求。

参考文献:

- [1] 来栋,陈涌,周鼎富,等. 激光雷达光束扫描及改进型VAD反演方法的仿真[J]. 激光技术,2008,32(6):584-586.
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] 蒋立辉,庄子波,李勇. 基于单激光雷达的低空风场反演与精度分析[J]. 红外与激光工程,2006,35(增):252-256.
JIANG L H, ZHUANG Z B, LI Y. Accuracy analysis for low attitude wind retrieval based on single lidar [J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2006, 35(suppl):252-256. (in Chinese)
- [3] 屈恒阔,张清源,阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. 中国光学,2012,5(3):242-247.
QU H K, ZHANG Q Y, RUAN Y T. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):242-247. (in Chinese)
- [4] 胡峰,胡春生,王省书,等. 成像激光雷达与摄像机外部位置关系的标定[J]. 光学精密工程,2011,19(4):938-943.
HU F, HU CH SH, WANG X SH, *et al.*. Calibration of external relation between imaging laser radar and camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):938-943. (in Chinese)
- [5] 胡宏伟,胡企铨. 地基激光测风雷达的光束扫描及风场反演[J]. 强激光与粒子束,2001,13(1):24-26.

- 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)
- [6] 郭裕兰, 万建伟, 鲁敏. 激光雷达目标三维姿态估计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):843-850.
GUO Y L, WAN J W, LU M, *et al.*. Three dimensional orientation estimation for lidar target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):843-850. (in Chinese)
- [7] NEWSOM R K, LIGON D, CALHOON R, *et al.*. Retrieval of micro scale wind and temperature fields from single- and dual-Doppler lidar data[J]. *J. Appl. Meteorology*, 2005, 44(9):1324-1344.
- [8] BANAKH V A, WERNER C. Retrieval of the turbulence parameters from spatial statistics of Doppler estimates[J]. *SPIE*, 2004, 5575:55-66.
- [9] 沈法华, 孙东松, 王忠纯, 等. 移动式多普勒激光雷达光束扫描及风场反演技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3):0312004-1.
SHEN F H, SUN D S, WANG ZH CH, *et al.*. Beam scanning and wind inversion technique of a mobile doppler lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):0312004. (in Chinese)
- [10] 黄敏, 王玉兰, 王娜, 等. 机载测风激光雷达下视 VAD 反演及算法仿真[J]. *激光技术*, 2012, 36(1):22-25.
HUANG M, WANG Y L, WANG N, *et al.*. Algorithm and simulation of downward velocity azimuth display of airborne wind lidars[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1):22-25. (in Chinese)
- [11] 竹孝鹏, 刘继桥, 刁伟峰. 相干多普勒测风激光雷达研究[J]. *红外*, 2012, 33(2):8-12.
ZHU X P, LIU J Q, DIAO W F, *et al.*. Study of coherent Doppler lidar system[J]. *Infrared*, 2012, 33(2):8-12. (in Chinese)

作者简介:



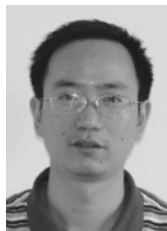
李 丽(1981—), 女, 河南濮阳人, 硕士, 工程师, 2003 年于郑州大学获得学士学位, 2006 年于北京理工大学获得硕士学位, 主要从事激光雷达系统设计及仿真等方面的研究。E-mail: lldeemail@163.com



谢亚峰(1983—), 男, 河南郑州人, 硕士, 工程师, 2004 年于南京理工大学获得学士学位, 主要从事激光接收、激光跟踪等方面的研究。E-mail: xieyafeng2140@sina.com



王灿召(1981—), 男, 河南平顶山人, 硕士, 工程师, 2003 年于郑州大学获得学士学位, 2006 年于北京理工大学获得硕士学位, 主要从事固体激光器及其工程应用等方面的研究。E-mail: wang-canzhao2003@163.com



董光焰(1978—), 男, 四川平昌人, 工程硕士, 高级工程师, 2000 年于长春光学精密机械学院获得学士学位, 2009 年于西安电子科技大学获得工程硕士学位, 主要从事空间光电系统、激光雷达等方面的研究。E-mail: optgyd@sina.com