

# 移动式多普勒激光雷达光束扫描及风场反演技术研究

沈法华<sup>1</sup> 孙东松<sup>2</sup> 王忠纯<sup>1</sup> 薛向辉<sup>2</sup> 陈廷娣<sup>2</sup> 窦贤康<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 盐城师范学院物理系, 江苏 盐城 224002  
<sup>2</sup> 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘要** 移动式多普勒激光雷达在外场实验过程中, 考虑到工作平台的随机性, 测量坐标系很可能不再是地面参考坐标系, 这为三维矢量风场的反演带来困难。提出采用三维空间坐标旋转变换的方法建立了测量坐标系与地面参考坐标系的一般关系式, 并进一步导出了反演三维风场的普遍公式。此外, 在光束扫描过程中, 由于二维扫描仪加工精度等的限制, 光束存在一定的定向误差。采用 Monte-Carlo 模拟方法定量研究了光束指向偏差引起的风场测量误差, 结果表明, 当水平风速为 100 m/s 时, 1° 的光束定向误差引起的水平风速大小误差为 0.712 m/s, 方向误差为 0.704°, 与理论计算结果一致。理论分析结果还表明: 当水平风速为 100 m/s 时, 1° 的光束最大定向偏差引起的水平风速大小的最大偏差为 1.16 m/s, 方向最大偏差为 1°。

**关键词** 测量; 多普勒激光雷达; 光束扫描; 移动平台; 反演技术

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0312004

## Beam Scanning and Wind Inversion Technique of a Mobile Doppler Lidar

Shen Fahua<sup>1</sup> Sun Dongsong<sup>2</sup> Wang Zhongchun<sup>1</sup> Xue Xianghui<sup>2</sup>  
Chen Tingdi<sup>2</sup> Dou Xiankang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224002, China  
<sup>2</sup> School of Space and Earth Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** During the field campaign, after taking into account the randomness of the working platform, the measuring coordinate system of the mobile Doppler lidar may no longer be the ground reference frame, which will lead to difficulty for the three-dimensional vector wind field inversion. Three-dimensional space coordinate rotation transformation method is proposed to establish the general relation between the measurement coordinate system and the ground reference frame, and then a general formula for three-dimensional wind field inversion is derived. In addition, in the process of beam scanning, due to the restriction of two-dimensional scanner machining precision and other limitations, there is a certain orientation error of the laser beam. The wind field measurement errors caused by beam pointing deviation are studied quantitatively by using Monte-Carlo simulation method. The results show that when the horizontal wind speed is 100 m/s, the horizontal wind speed error is 0.712 m/s and wind direction error is 0.704° for 1° beam orientation error, which is consistent with the theoretical results. The results of theoretical analysis also show that when the horizontal wind speed is 100 m/s, the maximum deviations of horizontal wind speed and direction would be 1.16 m/s and 1° respectively for 1° maximum deviation of beam direction.

**Key words** measurement; Doppler lidar; beam scanning; mobile platform; retrieval technique

**OCIS codes** 010.3640; 120.5800; 120.0280; 280.3340

## 1 引言

在大气科学、航空航天、风能发电和军事等领域中, 风是最重要的参数之一<sup>[1~4]</sup>。因此, 高精度的大

气风场数据具有重要的实际应用价值。多普勒激光雷达是近 20 多年发展起来的一种新型大气风场遥感探测设备, 在空间分辨率、角度方位、积分时间和

收稿日期: 2011-06-20; 收到修改稿日期: 2011-10-28

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(10KJB170012)资助课题。

作者简介: 沈法华(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事多普勒激光雷达方面的研究。E-mail: sfh81914@tom.com

机动性等方面比传统的声雷达和微波雷达有较大的提高,而且可以探测晴天条件下的三维风场,是目前对三维风场进行高精度、高时空分辨率遥感探测的最有效工具之一。

经过 20 多年的发展,多普勒激光雷达已从刚开始的地基固定平台<sup>[5~10]</sup>逐步转变为车载、舰载、机载以及星载等移动平台<sup>[1,11~14]</sup>。移动式与地基固定式多普勒激光雷达相比,其灵活性、机动性提高了不少,但同时也给数据处理带来了新的问题和困难。车载式、舰载式等移动式多普勒激光雷达在进行野外风场测量实验时,扫描仪的初始方位很可能不是指向预定的零方向,如正北方,而是与预定方位存在一定的角度偏差;同时雷达系统很可能不是处在水平状态,其工作平台与水平面存在一定的坡度。这些因素必须在三维风矢量反演过程中加以考虑,不然将产生风速反演误差,无法获取真实的风场数据。文献[15,16]讨论了星载和地基激光雷达的风场反演,但方法较为复杂,且其结果只适用于四波束扫描方法。此外,雷达系统,尤其是扫描子系统在平台移动过程中时常会受到颠簸震动,以及由于加工精度的限制,扫描仪存在一定的定向偏差,该偏差也会影响风速测量精度。然而,对这些具体问题的解决在国内外文献中还未见相关详细的报道。

针对移动式多普勒激光雷达三维风矢量反演的问题,本文提出了采用三维空间坐标旋转变换的方法建立测量坐标系与地面参考坐标系的一般关系式,导出了移动式多普勒激光雷达采用三波束扫描时三维风场反演的普遍公式,而且其推导过程对四波束等其它多波束扫描方法同样适用;针对扫描光束指向偏差引起的风场测量误差,分别采用理论分析法和 Monte-Carlo 模拟方法作了定量的研究,并给出了一致的研究结果,该结果为扫描系统转角分辨率设计指标的提出提供了依据。

## 2 移动平台风矢量反演

在地面参考坐标系  $oxyz$  中,风速矢量可以表示为

$$\mathbf{V} = V_x \mathbf{i} + V_y \mathbf{j} + V_z \mathbf{k}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  为坐标系  $oxyz$  3 个轴向单位矢量;  $V_x, V_y, V_z$  为风速矢量在三个轴向的速度分量。

在扫描仪规定的测量坐标系中,测量某个径向风速的发射光束方向为

$$\mathbf{r} = \sin \phi \cos \varphi \mathbf{e}_1 + \sin \phi \sin \varphi \mathbf{e}_2 + \cos \phi \mathbf{e}_3, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$  为测量坐标系中各个轴向的单位矢

量;  $\phi$  为光束天顶角;  $\varphi$  为光束方位角。

如图 1 所示,假定雷达工作平台的坡度为  $\alpha$ ,工作平台所在平面与水平面的交线为  $\mathbf{n}$ ,其与  $x$  轴正向夹角为  $\beta$ ,则相当于地面参考坐标系  $oxyz$  绕  $\mathbf{n}$  逆时针旋转了  $\alpha$  角。旋转后的坐标系  $ox'y'z'$  与原坐标系  $oxyz$  的关系为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{i}' \\ \mathbf{j}' \\ \mathbf{k}' \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{n}, \alpha) \begin{pmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \beta) \mathbf{R}(\mathbf{i}, \alpha) \mathbf{R}(\mathbf{k}, -\beta) \begin{pmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$  为旋转后坐标系  $ox'y'z'$  3 个轴向单位矢量;  $\mathbf{R}(\mathbf{n}, \alpha), \mathbf{R}(\mathbf{k}, \beta), \mathbf{R}(\mathbf{i}, \alpha)$  分别为绕  $\mathbf{n}$  轴、 $z$  轴和  $x$  轴逆时针旋转  $\alpha, \beta$  和  $\alpha$  的旋转矩阵。

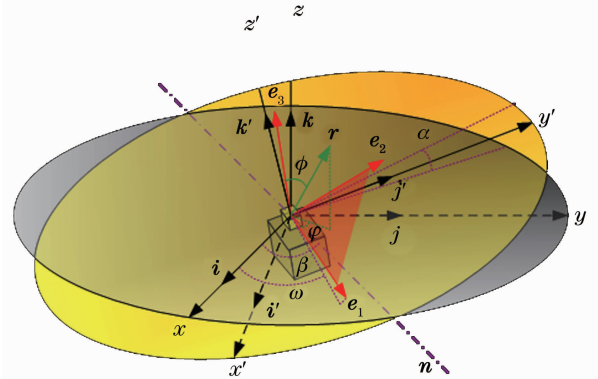


图 1 多普勒激光雷达工作平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Doppler lidar platform

又假定扫描仪的实际初始方位 ( $\mathbf{e}_1$  在  $xy$  平面上的投影方位) 和指定初始方位 (如正东方向, 即图中  $x$  轴正方向) 的夹角为  $\omega$ , 则测量坐标系与坐标系  $ox'y'z'$  的关系为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \omega) \begin{pmatrix} \mathbf{i}' \\ \mathbf{j}' \\ \mathbf{k}' \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \omega)$  为绕  $z$  轴逆时针旋转  $\omega$  的旋转矩阵。

由(3)、(4)式可得

$$\begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \omega + \beta) \mathbf{R}(\mathbf{i}, \alpha) \mathbf{R}(\mathbf{k}, -\beta) \begin{pmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

由(2)、(5)式可得

$$\mathbf{r} = [\sin \phi \cos \varphi, \sin \phi \sin \varphi, \cos \phi] \times \mathbf{R}(\mathbf{k}, \omega + \beta) \mathbf{R}(\mathbf{i}, \alpha) \mathbf{R}(\mathbf{k}, -\beta) \begin{pmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

由此,根据(1)和(6)式径向风速可表示为

$$V_r = \mathbf{U}\mathbf{r} = [\sin \phi \cos \varphi, \sin \phi \sin \varphi, \cos \phi] \times \mathbf{R}(\mathbf{k}, \omega + \beta) \mathbf{R}(i, \alpha) \mathbf{R}(\mathbf{k}, -\beta) \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

假定风场测量时采用三波束扫描<sup>[10]</sup>, 光束扫描方向  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$  表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sin \phi \cos \varphi_1 & \sin \phi \sin \varphi_1 & \cos \phi \\ \sin \phi \cos \varphi_2 & \sin \phi \sin \varphi_2 & \cos \phi \\ \sin \phi \cos \varphi_3 & \sin \phi \sin \varphi_3 & \cos \phi \end{bmatrix},$$

式中  $\phi$  为光束扫描天顶角;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  分别为 3 个径向的方位角。

利用(7)、(8)式可得 3 个径向风速为

$$\begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix} = \mathbf{M}\mathbf{R}(\mathbf{k}, \omega + \beta) \mathbf{R}(i, \alpha) \mathbf{R}(\mathbf{k}, -\beta) \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

所以, 风速矢量的 3 个轴向分量为

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \beta) \mathbf{R}(i, -\alpha) \times \mathbf{R}[\mathbf{k}, -(\omega + \beta)] \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{R}(\mathbf{k}, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}(i, -\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}[\mathbf{k}, -(\omega + \beta)] = \begin{bmatrix} \cos(\omega + \beta) & \sin(\omega + \beta) & 0 \\ -\sin(\omega + \beta) & \cos(\omega + \beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

当选取  $\phi$  为  $45^\circ$ ,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  分别为  $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$  时

$$\mathbf{M}^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

实际雷达系统在工作之前, 首先利用地质陀螺仪等方位、坡度测量设备测出激光雷达的方位角  $\omega$ 、平台的坡度  $\alpha$  以及坡的方位  $\beta$  等参数。在风场反演程序中, 这些是待定初始参数。然后将这些测得的参数值带入到反演程序中去, 根据(10)式就可以反演出各个轴向风速分量。若测量坐标系和地面参考坐标系重合, 即  $\alpha = \beta = \omega = 0$ , 则

$$\mathbf{R}(\mathbf{k}, \beta) \mathbf{R}(i, -\alpha) \mathbf{R}[\mathbf{k}, -(\omega + \beta)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

此时, (10)式就简化为

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

定义正北方向( $y$ 轴正方向)为零度、顺时针旋转角表示水平风向, 则水平风速  $V_h$  和水平风向  $\gamma$  分别为

$$V_h = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \quad (14)$$

$$\gamma = \begin{cases} \arccos(V_y/V_h), & V_x \geq 0 \\ 2\pi - \arccos(V_y/V_h), & V_x < 0 \end{cases} \quad (15)$$

### 3 光束指向误差产生的风速反演误差

激光雷达采用三波束扫描方式探测大气风场, 如图 2 所示, 实际 3 个扫描方向的单位矢量为

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} \sin \phi \cos(\varphi_1 + d\varphi_1) & \sin \phi \sin(\varphi_1 + d\varphi_1) & \cos \phi \\ \sin \phi \cos(\varphi_2 + d\varphi_2) & \sin \phi \sin(\varphi_2 + d\varphi_2) & \cos \phi \\ \sin \phi \cos(\varphi_3 + d\varphi_3) & \sin \phi \sin(\varphi_3 + d\varphi_3) & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中  $d\varphi_1, d\varphi_2, d\varphi_3$  分别为 3 个径向方位角的偏差量。为简单起见, 假定测量坐标系和地面参考坐标系重合, 则由(11)式得

$$\begin{bmatrix} V'_x \\ V'_y \\ V'_z \end{bmatrix} = \mathbf{M}'^{-1} \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

式中  $V'_x, V'_y, V'_z$  为实际的各个轴向风速分量。由(13)和(17)式可得测量风速与实际风速的关系为

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{M}' \begin{pmatrix} V'_x \\ V'_y \\ V'_z \end{pmatrix}, \quad (18)$$

将(16)式展开,取一级近似可得

$$\mathbf{M}' \approx \mathbf{M} + \begin{bmatrix} d\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & d\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & d\varphi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \phi \sin \varphi_1 & \sin \phi \cos \varphi_1 & 0 \\ -\sin \phi \sin \varphi_2 & \sin \phi \cos \varphi_2 & 0 \\ -\sin \phi \sin \varphi_3 & \sin \phi \cos \varphi_3 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

选取  $\phi$  为  $45^\circ$ ,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  分别为  $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ , 则

$$\mathbf{M}' \approx \mathbf{M} + \frac{\sqrt{2}}{4} \begin{bmatrix} d\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & d\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & d\varphi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 \\ -\sqrt{3} & -1 & 0 \\ \sqrt{3} & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

将(11)和(20)式代入到(18)式得

$$\begin{pmatrix} dV'_x \\ dV'_y \\ dV'_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{6} \begin{bmatrix} 4V'_y & \sqrt{3}V'_x + V'_y & -\sqrt{3}V'_x + V'_y \\ 0 & -3V'_x - \sqrt{3}V'_y & -3V'_x + \sqrt{3}V'_y \\ 2V'_y & -\sqrt{3}V'_x - V'_y & \sqrt{3}V'_x - V'_y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d\varphi_1 \\ d\varphi_2 \\ d\varphi_3 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

由(14)和(15)两式可得

$$dV'_h = \frac{V'_x}{V'_h} dV'_x + \frac{V'_y}{V'_h} dV'_y, \quad (22)$$

$$d\gamma' = \pm \frac{V'_y dV'_x - V'_x dV'_y}{V'^2_h}. \quad (23)$$

入到(22)和(23)式,得到由此引起的水平风速和风向测量误差为

$$\delta V'_h = \frac{V'_h}{\sqrt{6}} \delta\varphi, \quad (24)$$

$$\delta\gamma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \delta\varphi. \quad (25)$$

假定激光雷达系统水平风速探测动态范围为  $\pm 100$  m/s,采用 Monte-Carlo 方法模拟由于光束指向偏差引起的水平风速大小和方向偏差。设定水平风速大小为 100 m/s,方向在  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围内任意变化,3 个扫描方向的光束指向误差都为  $\delta\varphi$ ,模拟次数设为 100000 次。图 3 是  $\delta\varphi=1^\circ$  时的模拟结果,可以看出:当水平风速为 100 m/s,  $\delta\varphi=1^\circ$  时引起的水平风速大小误差为 0.712 m/s,方向误差为  $0.704^\circ$ ,与(24)和(25)式的理论推导结果一致。

如果假设 3 个径向的光束指向最大偏差量都为  $d\varphi_m$ ,将(21)式分别代入到(22)和(23)式,得到由此引起的水平风速和风向测量最大偏差为

$$(dV'_h)_m = \frac{2}{3} V'_h d\varphi_m, \quad (26)$$

$$(d\gamma')_m = d\varphi_m. \quad (27)$$

假定  $d\varphi_m = \pm 1^\circ$ ,当水平风速大小为 100 m/s 时,引起的水平风速和风向测量最大偏差分别为  $\pm 1.16$  m/s 和  $\pm 1^\circ$ 。

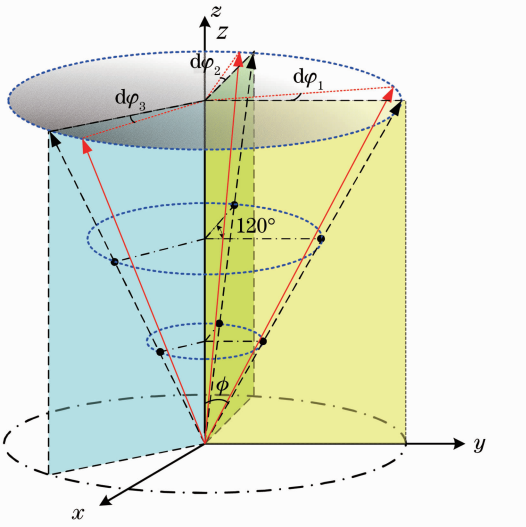


图 2 风速测量时的光束扫描示意图

Fig. 2 Beam scanning diagram for wind speed measurements

假设 3 个径向的光束指向方差都为  $(\delta\varphi)^2$ ,即  $(\delta\varphi_1)^2 = (\delta\varphi_2)^2 = (\delta\varphi_3)^2 = (\delta\varphi)^2$ ,将(21)式分别代

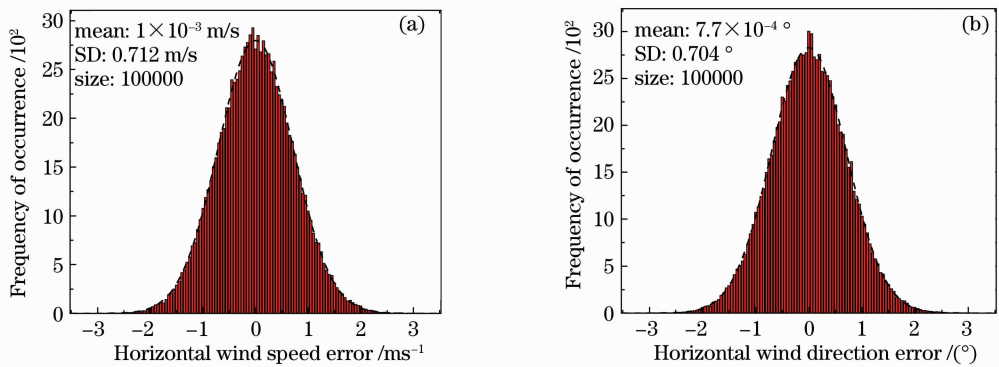


图3 采用 Monte-Carlo 方法模拟的水平风速大小和方向偏差

Fig. 3 Horizontal wind speed and direction deviation obtained by Monte-Carlo simulation method

## 4 结 论

本文给出了移动式多普勒激光雷达采用三波束定向扫描法探测三维矢量风场时风场反演的一般公式,解决了移动平台中测量坐标系与地面坐标系不一致造成的风场反演困难。该公式推导过程同样适用于四波束等多波束扫描方法。此外,定量研究了光束扫描过程中,光束指向误差产生的水平风速大小和方向测量误差。结果表明:光束指向误差造成的水平风速大小误差与水平风速的大小及光束指向误差大小成正比关系;光束指向误差造成的水平风速方向误差只与光束指向误差大小有关,且也成正比关系。该分析结果为定量要求扫描系统的转角分辨率设计指标提供了依据。

## 参 考 文 献

- 1 P. Ingmann. Status of the Doppler wind lidar profiling mission ADM-Aeolus [R]. ESA Report, 1999. SP-1233
- 2 S. M. Hannon, K. S. Barr, D. K. Jacob *et al.*. Application of pulsed Doppler lidar in the airport terminal area [C]. *SPIE*, 2005, **5653**: 186~197
- 3 David A. Simth, Michael Harris. Wind turbine control having a lidar wind speed measurement apparatus, US Patent, 7281891B2 [P]. [2007-10-16]
- 4 Xu Daping, Zhang Xinfang, Liu Yibing. Overview of relevant control problems of wind turbines [J]. *Electric Power*, 2005, **38**(4): 70~74  
徐大平, 张新房, 柳亦兵. 风力发电控制问题综述 [J]. *中国电力*, 2005, **38**(4): 70~74
- 5 C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertzog *et al.*. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation and first climatological results [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2410~2421
- 6 M. T. Dehring, C. A. Nardell, J. C. Pavlich *et al.*. Performance and comparison of 532 nm and 355 nm ground winds

lidars [C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 337~347

- 7 Z. S. Liu, D. Wu. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 7079~7086
- 8 Fahua Shen, Hyunki Cha, Dongsong Sun *et al.*. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar [J]. *Opt. Rev.*, 2008, **15**(4): 204~209
- 9 Shen Fahua, Wang Zhongchun, Liu Chenglin *et al.*. Measurement on wind field with Mie Doppler lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1537~1541  
沈法华, 王忠纯, 刘成林等. 米氏散射多普勒激光雷达探测大气风场 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1537~1541
- 10 Wang Bangxin, Shen Fahua, Sun Dongsong *et al.*. Beam scanning and wind field measurement of direct detection Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 69~72  
王邦新, 沈法华, 孙东松等. 直接探测多普勒激光雷达的光束扫描和风场测量 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 69~72
- 11 B. M. Gentry, H. L. Chen, S. X. Li. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 1231~1233
- 12 Z. S. Liu, B. Y. Liu, S. H. Wu *et al.*. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1485~1487
- 13 Fahua Shen, Hyunki Cha, Jihui Dong *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 593~597
- 14 Lei Tang, Zhifeng Shu, Jihui Dong *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double-edge technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(8): 726~731
- 15 Hu Hongwei, Hu Qiquan. Beam scanning and inversion method for lidar detecting wind [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 720~723  
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): 720~723
- 16 Hu Hongwei, Hu Qiquan. The beam scanning and inversion method for detecting wind by lidar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1): 24~26  
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

栏目编辑: 谢 婧