

基于斜坡检测的多普勒激光雷达低空风切变预警算法

蒋立辉^{1,2}, 闫妍¹, 熊兴隆^{1,2}, 陈柏纬³, 陈星², 章典¹

(1. 中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300;
2. 民航气象技术研究所, 天津 300300; 3. 香港天文台, 香港 999077)

摘要: 提出了一种新的基于斜坡检测的激光雷达低空风切变预警算法, 该算法将下滑道扫描与单双斜坡检测相结合。首先, 把下滑道扫描方式下获取的激光雷达径向风速投影到下滑道上, 进行数据重构。其次, 对逆风风廓线进行单斜坡及双斜坡梯度变化的检测并以国际上规定的低空风切变阈值及风切变强度因子判别公式判断风切变。使用香港天文台实际激光雷达数据进行了实验验证, 结果表明新方法能够检测出单斜坡未能检测出的风切变。该方法是有效的, 对于提高风切变的预警率有重要意义。

关键词: 斜坡检测; 低空风切变; 激光雷达; 下滑道扫描

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0106001

Doppler lidar alerting algorithm of low-level wind shear based on ramps detection

Jiang Lihui¹, Yan Yan², Xiong Xinglong^{1,2}, Chen Bowei³, Chen Xing¹, Zhang Dian²

(1. Tianjin key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Civil Aviation Meteorological Institute, Tianjin 300300, China; 3. Hong Kong Observatory, Hongkong 999077, China)

Abstract: A new lidar low-level wind shear alerting algorithm based on ramps detection was presented in this paper. Glide path scanning and combination of double and simple ramp detection had been applied in this new algorithm. Firstly, the lidar radial velocity was projected onto the glide-path and headwind wind profile was restricted into. Secondly, single ramps and the changes of double ramps declivity were detected by the new algorithm. The results on provisions of international low-level wind shear threshold and the wind shear alerting discriminating judgment formula was compared to come to the conclusion. The performance of the proposed method was verified through the real data from Hong Kong Observatory. The results show that the proposed algorithm detects the wind shear which the single ramp fails to detect. The new proposed method is effective, it is significant to raise the alarm rate.

Key words: ramps detection; low-level wind shear; lidar; glide-path scanning

收稿日期: 2015-06-10; 修订日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1433202); 中央高校基本科研基金

作者简介: 蒋立辉(1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士后, 主要研究方向为激光雷达探测、图像处理及光电子技术等。

Email: jlhhit@163.com

0 引言

低空风切变是指 600m 高度以下从空间一点到另一点风矢量的变化,是两点间风的矢量差。由于其具有发生时间短、尺度小、强度大等特点,严重影响飞机的飞行安全,对低空风切变进行有效预警十分必要^[1]。

目前,国内民航机场使用的多为多普勒天气雷达^[2],它可以用来探测云雨天气条件下的风切变,但无法探测晴空条件下的风切变^[3]。多普勒激光雷达则可解决此问题,并具有高精度、高分辨率的特点^[4-8]。2002 年,香港天文台在香港国际机场安装了一部红外相干多普勒激光雷达,用于低空风切变的探测与预警。在天气雷达预警算法研究方面,2013 年 Augros^[9]通过组网融合将径向风速投影到直角坐标系中,对比观测格点与邻近周围格点的差别来确定风切变的存在。2015 年周生辉^[10]提出对风切变区不均匀特点,利用风场反演方法,用临近格点之间风矢量差来表示风切变的大小。在激光雷达预警算法研究方面,2012 年陈柏纬^[11]利用 F 因子预警低空风切变。2014 年陈柏纬^[12]利用涡流耗散率预警低空风切变,由于 F 因子和涡流耗散率的阈值在国际上没有明确规定,需要大量实验来确定经验阈值,在实际应用中仍需要不断研究。至今香港国际机场使用的是基于单斜坡检测的低空风切变自动预警算法^[13],并提出了一种新的下滑道扫描方式,其扫描周期比传统的 PPI 扫描短,从而提高了预警效率,且更加具有针对性。香港国际机场根据其提出的斜坡检测预警算法很大程度提高了风切变预警率^[14-15]。

文中在其预警算法的基础上,考虑风切变的双斜坡模式,提出了一种基于单双斜坡检测的激光雷达低空风切变预警算法。首先,对下滑道扫描方式得到的径向数据进行处理,经过质量控制之后对下滑道附近影响飞机起飞与着陆的径向速度数据点进行数据重构,进而形成重组逆风风廓线;最后,对逆风风廓线进行斜坡以及斜坡梯度变化的检测,以国际上规定的阈值 15 海里/小时(kt)和风切变强度因子判别公式发出预警。

1 相干多普勒激光雷达

相干多普勒激光雷达探测的是回波信号和发

射的激光信号之间的差频信号^[16]。基本测速原理是以激光为光源向大气发射激光脉冲,接收大气气溶胶粒子的后向散射信号,利用光外差探测技术获得激光多普勒频移信息,进而得到径向风速^[17-19]。文中采用的激光雷达激光波长为 2 μm、脉冲能量为 2 mJ、脉冲重复频率为 500 Hz、径向数据更新频率为 10 Hz^[14]。扫描方式为下滑道扫描,具体扫描参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达扫描参数

Tab.1 Scanning parameters of lidar

Spatial resolution	Measurement distance	Rate of the scanner
100 m	400 m-10 km	15-18(°) s ⁻¹

2 基于单双斜坡检测的预警算法

2.1 下滑道扫描方法

文中扫描方法为香港国际机场提出的下滑道扫描^[19-20]。激光雷达沿着下滑道扫描每完成一个扫描周期得到径向数据的时间是 2 min,而传统的 PPI 扫描每完成一个扫描周期需要 6 min 左右。下滑道扫描集中观测飞机起飞和着陆区域内的风场情况,在沿着下滑道扫描过程中方位角和俯仰角同时变化,并要求激光光束与跑道方向的夹角少于 30°。飞机起飞与着陆的情况下下滑道与跑道的夹角不同,飞机起飞离场时下滑道与跑道夹角为 6°,飞机着陆进场时下滑道与跑道夹角为 3°。下滑道扫描示意图如图 1 所示。

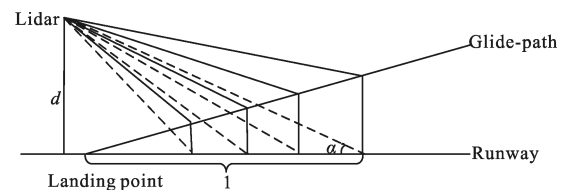


图 1 下滑道扫描示意图

Fig.1 Schematic diagram of a glide-path scan

由于预警风切变时只需下滑道附近影响飞机起飞与着陆的径向速度点,因此径向数据经过质量控制后需要将下滑道周围的风速数据提取出来,提取有用信息必须确定激光光束与下滑道的相对位置关系,建立下滑道方程及有效径向数据点的坐标范围,从而提取有效数据进行逆风风廓线重组。

2.2 质量控制方法

经过下滑道扫描得到的径向数据可能存在异值点,这些异值点可经过质量控制来进行排除,基本思想是比较相邻两个数据点的值,若差值超过预设的阈值,则用中值滤波器的值来代替此值,阈值是由激光雷达相邻距离门的频率分布所决定的^[15]。

由下滑道扫描以及经过质量控制之后得到的径向数据组成逆风风廓线,还需要对下滑道附近的径向数据进行筛选形成重组逆风风廓线,重组过程包括计算数据坐标范围、数据点筛选、逆风风廓线重组。

2.3 逆风风廓线重组

假设下滑道被一条一定尺度的管道包裹着,下滑道就在管道的中央,进行重组逆风风廓线的径向数据点都落在管道内,为了提取出管道内的有效数据点,以雷达为原点建立坐标系,将径向风速数据根据笛卡尔坐标系进行转换。

以飞机着陆进场为例,此时下滑道与跑道夹角为 3° ,经过将管道分别对 xoy, yoz, xoz 平面进行投影,并根据激光光束与跑道方向的夹角小于 30° 作为条件可求出 x 轴, y 轴, z 轴的坐标范围:

$$\begin{cases} d-150 \leq x \leq d+150 \\ l \leq y \leq \frac{d}{\tan \alpha} \\ |z-h| \leq 30 \end{cases} \quad (1)$$

式中: d 为激光雷达到跑道的距离; l 为激光雷达到跑道的垂足到着陆点的距离; α 为激光光束与跑道方向的夹角,参数如图 1 所示; h 为在下滑道上的径向数据点到 y 轴的垂足距离 $h = \tan 3^\circ (y - l)$ 。由公式(1)得到的坐标范围可以将管道内的有效径向数据点筛选出来。

在公式(1)坐标范围内的径向数据点都筛选出来之后,将这些径向数据点投影到跑道上进行数据重构,然后在其基础上进行单双斜坡检测,继而预警风切变。

2.4 单双斜坡结合检测

风切变风廓线有单斜坡和双斜坡两种模式,检测风切变也就是检测逆风风廓线中的斜坡。单斜坡是由斜坡长度 D , 逆风风廓线在斜坡长度 D 上的速度变化率组成的 ΔV 。其原理示意图如图 2 所示。

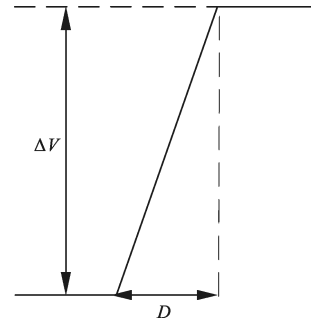


图 2 风切变单斜坡原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of a windshear single ramp

双斜坡是由两个单斜坡组成,两个单斜坡之间的间距为 D_s , 双斜坡含义为检测速度梯度上的变化率来预警风切变。其原理示意图如图 3 所示。

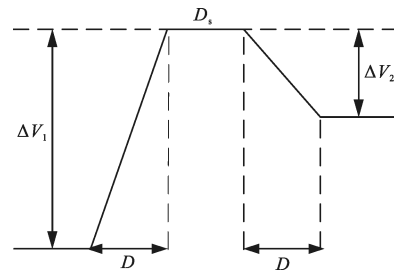


图 3 风切变双斜坡原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of a windshear double ramp

逆风风廓线上斜坡发生的位置可根据普遍差值公式来检测^[20-22], 普遍差值公式包含一个平滑公式和差值公式, 即相当于经过一个数字带通滤波器的逆风风廓线形成的波峰(波谷)点即是产生了局部风切变的速度值。

将逆风风廓线组成设为 U , 经过平滑公式变为 UI , 公式如(2)所示。

$$UI(d) = \frac{1}{4} U(d-\Delta d) + \frac{1}{2} U(d) + \frac{1}{4} U(d+\Delta d) \quad (2)$$

式中: Δd 为采样间隔; d 为采样数据点。这个平滑公式作用相当于一个低通滤波器, 在平滑公式的基础上进行差值公式, 检测单斜坡公式如(3)所示。

$$UID(\tilde{d}) = UI(d+D) - UI(d) \quad (3)$$

式中: $\tilde{d} = d + \frac{D}{2}$ 。

检测双斜坡公式如(4)所示。

$$UID(\tilde{d}) = \frac{1}{2} \{ [UI(d+D) - UI(d)] - [UI(d+2D+D_s) - UI(d+D+D_s)] \} \quad (4)$$

式中： $\tilde{d}=d+\frac{D}{2}+\frac{D+D_s}{2}$ 。

式中： \tilde{d} 表示产生风切变的中心位置； D 表示检测间隔，根据飞机响应时间取不同尺度的检测间隔； D_s 表示双斜坡之间的距离间隔，取值为 $0、D/2、D$ 。差值公式作用相当于一个高通滤波器。

应用普遍差值公式时，逆风风廓线会发生丢失有效数据点的情况，为避免这一情况发生，采取人为延长逆风风廓线^[20]，数据值等于逆风风廓线两侧边缘值，人为延长的数据会影响风切变预警判断，需要截取有效数据长度，剔除人为延长的径向数据点，文中人为延长长度定为 1600 m，以便于后期截取有效判别风切变的径向数据长度。

经过普遍差值公式形成的极值点就是局部最强风切变发生的中心位置，同时超过阈值的点也是发生风切变的中心位置，检测单斜坡时，为了能得到风切变发生的最大速度变化率，对斜坡长度进行收缩与扩张进而得到最大风切变检测范围，如图 4、图 5 所示。

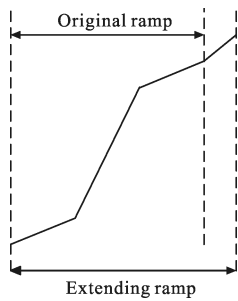


图 4 斜坡扩张示意图

Fig.4 Schematic diagrams of ramp expansion

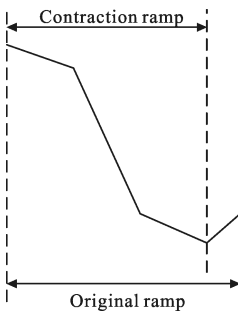


图 5 斜坡收缩示意图

Fig.5 Schematic diagrams of ramp contraction

当多个位置产生风切变预警时，根据风切变强度因子判别公式找到局部风切变最强位置。1983 年 Woodfield 和 Woods 建议风切变强度因子 I 如公式(5)

所示^[23]。

$$I = \frac{dV}{dt} \left(\frac{\Delta V}{V_{app}} \right)^2 = \frac{1}{V_{app}} \left| \frac{\Delta V}{R^{1/3}} \right|^3 \quad (5)$$

式中： $\frac{dV}{dt}$ 为风速变化率； ΔV 为风速变化总量； R 为斜坡长度； V_{app} 为飞机标准进近速度。文中通过局部最强风切变参数 $\frac{\Delta V}{R^{1/3}}$ 来判断。

3 方法验证及对比分析

使用不同时刻相干多普勒激光雷达观测数据对该方法进行了实验验证。径向数据经过质量控制和数据重构后组成的逆风风廓线如图 6 所示，并且为了防止数据丢失对逆风风廓线进行了人为延长，延长值与边缘两侧值相等。图中斜线表明下滑道高度(英尺，1 ft=0.304 8 m)与到跑道端点距离关系。

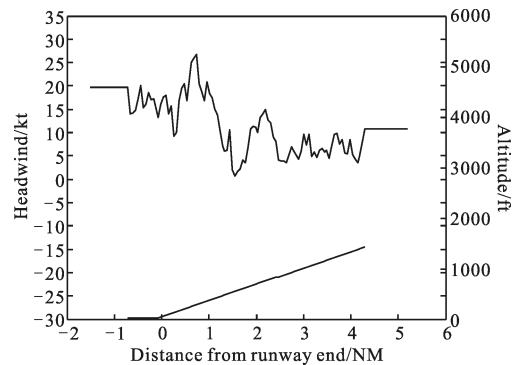


图 6 逆风风廓线组成

Fig.6 Composition of headwind profiles

将延长后的逆风风廓线进行平滑处理如图 7 所示。从图中可以看出经过平滑的逆风风廓线滤除了原风廓线的波动，并且进行平滑过程影响的数据是人为延长的数据，不是真实数据。

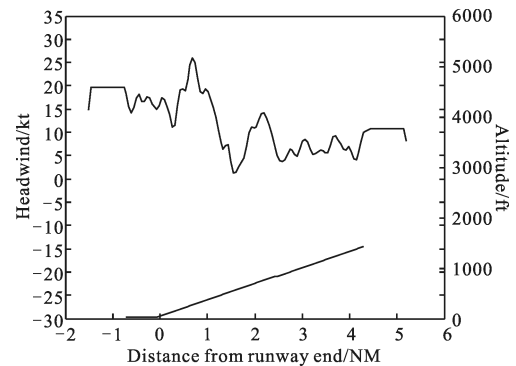


图 7 平滑逆风风廓线示意图

Fig.7 Schematic diagrams of smooth headwind profiles

对经过平滑的逆风风廓线进行不同尺度间隔的单斜坡检测如图 8、图 9 所示。图中‘+’表示极点值，表明特定范围内发生风切变最强处，‘o’表明超过阈值的位置，经过不同尺度范围叠加整合，距离跑道着陆点-0.3~2.3 海里(NM)产生风切变预警，而根据风切变强度因子判别公式 0.7~1.5 NM 产生局部最强风切变， $\frac{\Delta V}{R^{1/3}}$ 值为 26.56，风速变化值为 24.665 kt。

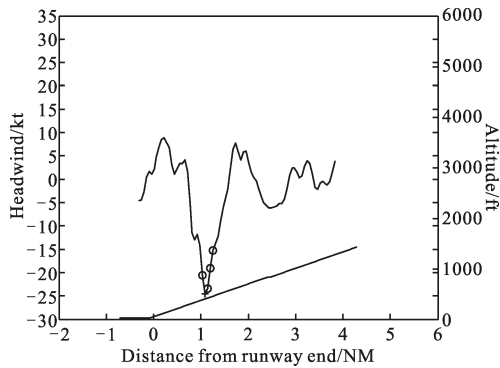


图 8 单斜坡检测逆风风廓线示意图

Fig.8 Schematic diagrams of single ramp detection in headwind profiles

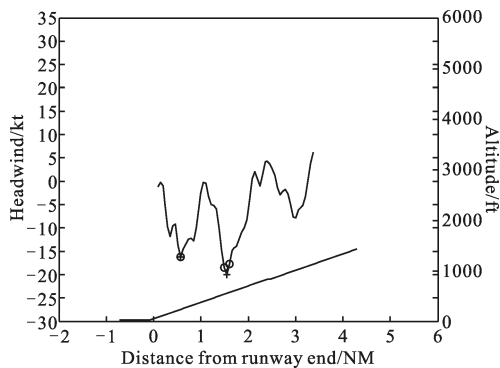


图 9 单斜坡检测逆风风廓线示意图

Fig.9 Schematic diagrams of single ramp detection in headwind profiles

对经过平滑的逆风风廓线进行不同尺度间隔的双斜坡检测，选取了一组斜坡间隔为 0($D_s=0$)产生风切变的示意图如图 10 所示。图中表明距离跑道着陆点-0.3~2.5 NM 产生风切变预警，而局部最强风切变经过强度因子判别公式发生在单斜坡检测中。

以上实验说明若只使用单斜坡进行风切变预警，不仅斜坡梯度的变化率产生的风切变检测不出来而且预警范围可能不准确。使用单双斜坡结合预警风切变比仅使用单斜坡检测，得到了更为准确的风切变预警范围，对提高预警范围准确性有一定的意义。由上述实验可知预警范围由-0.3~2.3 NM 到了-0.3~

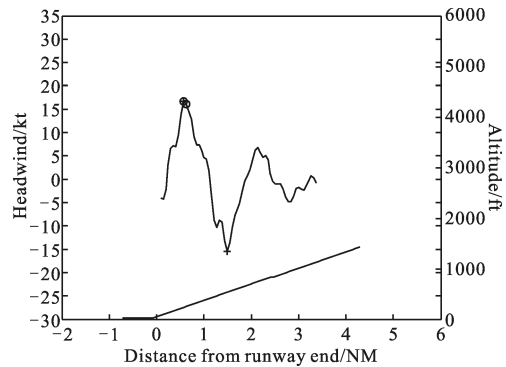


图 10 双斜坡检测逆风风廓线示意图

Fig.10 Schematic diagrams of double ramp detection in headwind profiles

2.5 NM，同时验证了算法的有效性。

双斜坡对大尺度风切变更有利，当逆风风廓线中单斜坡无法检测到风切变，而在双斜坡中存在较大尺度风切变时，检测图如图 11~14 所示。图 11、图 12 表明在以 2.3 NM 为中心位置发生了因斜坡梯度的变化引起的较大尺度风切变，局部最大斜坡梯度变化率为 16.23 kt。图 13、图 14 表明在以 0.9 NM 为中心位置发生了因斜坡梯度的变化引起的较大尺度风切变，梯度变化率为 15.06 kt。

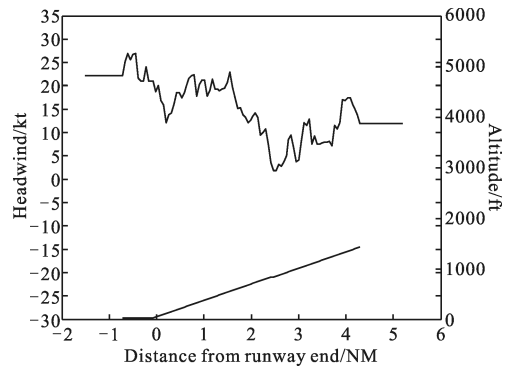


图 11 逆风风廓线组成

Fig.11 Composition of headwind profiles

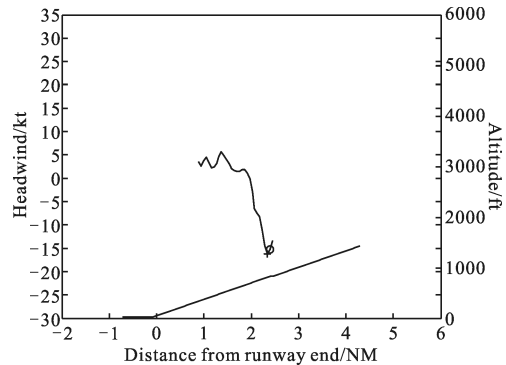


图 12 双斜坡检测逆风风廓线示意图

Fig.12 Schematic diagrams of double ramp detection in headwind profiles

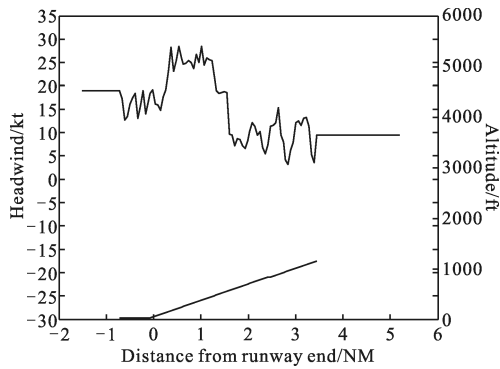


图 13 逆风风廓线组成

Fig.13 Composition of headwind profiles

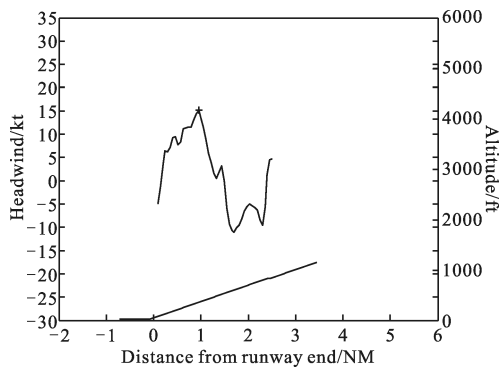


图 14 双斜坡检测逆风风廓线示意图

Fig.14 Schematic diagrams of double ramp detection in headwind profiles

通过单斜坡检测与单双斜坡结合检测进行对比实验可知,当单斜坡可以检测到风切变时,单双斜坡结合检测的范围为 $-0.3\sim 2.5$ NM,而单斜坡检测范围为 $-0.3\sim 2.3$ NM。增加了 0.2 NM的检测范围,不仅验证了算法的有效性,也对检测范围精度的提高有一定意义。当单斜坡未能检测到风切变时,双斜坡捕捉到了较大尺度的风切变,检测范围分别为 $1.4\sim 3.2$ NM和 $0.1\sim 1.8$ NM。不仅验证了算法的有效性,也说明考虑双斜坡是十分必要的。综上所述,文中算法对提高检测范围的精度及预警率是有重要意义的,同时针对国内机场特点更具实际价值。

文中预警算法具有以下优点:

(1) 当仅应用单斜坡进行检测时,检测范围可能发生漏报,加入双斜坡可提高检测范围精度。

(2) 双斜坡能够检测到单斜坡未能检测到的较大尺度风切变,对提高预警率是有一定意义的。

4 结论

提出了将下滑道扫描与单双斜坡检测相结合的一种低空风切变预警算法,使用激光雷达实际数据验证了算法的有效性,同时也说明了考虑双斜坡的必要性,对提高风切变预警率有重要意义。此算法将在实践中进一步论证及通过实验进行修正改进。

参考文献:

- [1] Huang T, Yu H, Tian Y H, et al. Salient region detection and segmentation for general object recognition and image understanding[J]. *Science China*, 2011, 54(12): 2461-2470.
- [2] Tsai Y C. Terminal Doppler weather radar observation of atmospheric flow over complex terrain during tropical cyclone passages[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(12): 1697-1710.
- [3] Jiang Lihui, Tian Baiquan, Xiong Xinglong, et al. Numerical simulation of Doppler lidar based on low-level wind shear [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1761-1766. (in Chinese)
蒋立辉, 田百全, 熊兴隆, 等. 基于多普勒激光雷达低空风切变的数值仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1761-1766.
- [4] Jiang Lihui, Gao Zhiguang, Xiong Xinglong, et al. Identification of the type of low-level shear wind based on lidar image processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3410-3415. (in Chinese)
蒋立辉, 高志光, 熊兴隆, 等. 基于激光雷达图像处理的低空风切变类型识别研究 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3410-3415.
- [5] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsen. The current development of ranging type direct of the laser active imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 28-38. (in Chinese)
徐正平, 沈宏海, 许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. *中国光学*, 2015, 8(1): 28-38.
- [6] Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min, et al. Lidar target 3D pose estimation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 843-850. (in Chinese)
郭裕兰, 万建伟, 鲁敏, 等. 激光雷达目标三维姿态估计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 843-850.
- [7] Zhang Yuanqing, Li Li, Li Quanxi, et al. Helicopter crash lidar integrated information processing system [J]. *Chinese*

- Optics*, 2013, 6(1): 80–87. (in Chinese)
张清源, 李丽, 李全熙, 等. 直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 80–87.
- [8] Zhang Dayong, Wu Wenqi, Wu Meiping. Airborne lidar system calibration method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2806–2813. (in Chinese)
章大勇, 吴文启, 吴美平. 机载激光雷达系统标定方法[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2806–2813.
- [9] Augros C, Tabary P, Anquez A, et al. Development of a nationwide, low-level wind shear mosaic in france [J]. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(5): 1241–1260.
- [10] Zhou Shenghui, Wei Ming, Zhang Peichang, et al. Doppler radar wind retrieval windshear recognition [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(1): 119–127. (in Chinese)
周生辉, 魏鸣, 张培昌, 等. 多普勒雷达反演风场的风切变识别研究[J]. 热带气象学报, 2015, 31(1): 119–127.
- [11] Chan P W. Application of LIDAR-based F-factor in windshear alerting[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, 21(2): 193–204.
- [12] Hon K K, Chan P W. Application of LIDAR-derived eddy dissipation rate profiles in low-level wind shear and turbulence alerts at Hongkong international airport [J]. *Meteorological Applications*, 2014, 21(1): 74–85.
- [13] Chan P W, Hon K K, Shin D K. Combined use of headwind ramps and gradients based on LIDAR data in the alerting of low-level windshear/turbulence[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2011, 20(6): 661–670.
- [14] Shun C M, Chan P W. Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(5): 637–655.
- [15] Chan P W, Shun C M, Wu K C. Operational LIDAR-based system for automatic windshear alerting at the Hong Kong International Airport [C]//12th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2006.
- [16] Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. The progress of the Doppler wind lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3): 161–168. (in Chinese)
周小林, 孙东松, 钟志庆, 等. 多普勒测风激光雷达研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 161–168.
- [17] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Coherent lidar wind field wind measurement technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720–1724. (in Chinese)
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1720–1724.
- [18] Han Yan, Sun Dongsong, Weng Ningquan, et al. 60 km car Rayleigh wind measurement lidar research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1414–1419. (in Chinese)
韩燕, 孙东松, 翁宁泉, 等. 60 km 车载瑞利测风激光雷达研制[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1414–1419.
- [19] Lee Y F, Chan P W. LIDAR-based F-factor for wind shear alerting: different smoothing algorithms and application to departing flights[J]. *Meteorological Applications*, 2014, 21(1): 86–93.
- [20] Shun C M, Lau S Y, Cheng C M, et al. LIDAR observations of wind shear induced by mountain lee waves [C]//11th Conference on Mountain Meteorology and MAP Meeting 2004, 2004.
- [21] Haynes A. Description of a program developed for the analysis of windshears experienced during aircraft approach to landing [R]. Royal Aircraft Establishment Technical Memorandum FS 321, 1980.
- [22] Woodfield A A, Woods J F. Worldwide experience of wind shear during 1981–1982. [C]//AGARD Flight Mechanics Panel Conference on ‘Flight Mechanics and System Design Lessons from Operational Experience’, 1983.
- [23] Jones J G, Haynes A. A peakspotter program applied to the analysis of increments in turbulence velocity [R]. Royal Aircraft Establishment Technical Report 84071, 1984.