

基于短距相干测风激光雷达的机场低空风切变观测

张洪玮¹, 吴松华^{1,2*}, 尹嘉萍³, 王琪超¹

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院 海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 青岛镭测创芯科技有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要:介绍了低空风切变及其预警的研究工作、相干多普勒测风激光雷达反演风场算法以及计算下滑道逆风廓线算法. 进一步分析了 2015 年冬季和 2016 年春季北京首都机场低空风切变观测实验中所观测到的风切变案例, 利用多种测量模式开展案例中风切变的监测, 并对风切变观测结果进行了验证. 实验结果表明, 短距相干多普勒测风激光雷达多种测量模式均可能有效探测低空风切变.

关键词:低空风切变; 相干多普勒激光雷达; 逆风廓线; 航空安全

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Airport low-level wind shear observation based on short-range CDL

ZHANG Hong-Wei¹, WU Song-Hua^{1,2*}, YIN Jia-Ping³, WANG Qi-Chao¹

(1. Ocean Remote Sensing Institute, College of Information and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling,
Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;
3. Qingdao Leicent Co. Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: In this paper, the disastrous influence to the landing aircraft of low-level wind shear and present study to the low-level wind shear field observation have been explained briefly and the method of retrieving headwind profiles from step wise PPI scans in detail. The data with multi-mode analyzed in this paper are based on short range CDL configured at BCIA (Beijing Capital International Airport) from December 2015 to March 2016. The reliability of algorithms have been proved by wind shear reports from the crew and the airport terminal control office. CDL has been proved to be an effective tool to capture the low-level wind shear events under clear conditions.

Key words: low-level wind shear, coherent Doppler lidar, headwind profiles, civil aviation safety

PACS: 42.62. Eh

引言

国际民航组织(ICAO)规定:低空风切变是指地面以上 2 000 英尺高度内,风矢量或其分量沿垂直方向或某一水平方向的变化^[1].低空风切变的主要类型有:风的垂直切变(垂直方向上两点之间的风速和(或)风向的改变)、风的水平切变(在水平方向

上的两点之间风速和(或)风向的改变)、垂直气流的切变(上升或下降气流(垂直风)在水平方向上两点之间的改变)^[1-3].低空风切变的产生主要原因有:(1)锋面运动(Frontal activity)、雷暴天气(Thunderstorms)、逆温现象(Temperature inversion)和地形、地表建筑物影响(Surface Obstructions).由于地表摩擦力和地表建筑物、障碍物的存在,在建筑物前

收稿日期:2017-08-29,修回日期:2017-12-20

Received date: 2017-08-29, revised date: 2017-12-20

基金项目:国家自然科学基金(41375016, 41471309), 国家 863 计划(2014AA09A511)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41375016, 41471309), and the National High Technology Research and Development Program (2014AA09A511)

作者简介(Biography):张洪玮(1989-),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事相干多普勒测风激光雷达和相干多普勒测速技术研究. E-mail: zhanghongwei@stu.ouc.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: wush@ouc.edu.cn

后会产生湍流,同时建筑物会改变风廓线的垂直结构导致垂直切变。

低空风切变具有尺度小、发生周期短和强度大等特点,并多伴随雷暴等恶劣天气产生,为气象监测部门探测、预警风切变带来困难^[4-5]。据统计,在2014~2016年间共有51次的航空事故是由于低空风切变造成,占据总航空事故的19%^[6-7]。目前广泛应用于低空风切变探测的仪器主要有:超声风速计、多普勒声雷达、多普勒激光雷达和气象微波雷达。超声风速计利用发射端发送声波脉冲到达接收端的时间或者频率的差别来计算风速和风向,具有工作稳定性高、风速测量精度高、流场破坏小等优点,但超声风速计属于点测量仪器,只能用来获取空间中某一单点的风速信息,不能获得整个风场的空间分布,因而在风切变测量中的应用受到限制^[8]。芬兰 Vaisala 公司基于安装于地表 10 m 高度处的多个超声风速计构成的低空风切变预警系统 LLWAS 已经被安装于全球多个机场,广泛用于近地面的水平切变探测^[9]。多普勒声雷达是利用湍流中大气折射率不均匀分布的特性,测量回波信号在频率域的多普勒频移,测量地面之上几十米、几百米直至一公里内高度内的风廓线,具有很高的测量精度,可同时测量折射率结构常数等湍流参量廓线。但其近地面的测量能力不足,只能测量几十米高度以上的风场信息;同时其发射波束方向固定不可移动,只能测量雷达上方区域,不能实现扫描区域的自主设计^[10]。微波雷达是测量风廓线的主要设备,它通过向大气中发射微波脉冲,利用大气湍流对微波后向散射信号的多普勒频移来反演大气风廓线。微波雷达的工作波段通常在 30 MHz 至 3 000 MHz 之间,主要利用大气湍流对电磁波的散射作用对大气风场等物理量进行探测^[11]。由于微波风廓线雷达的波长较长,其探测信号主要为雨、雪和冰等大颗粒的散射信号,因此在天气较为恶劣的条件下微波风廓线雷达有不错的探测性能,而在晴空少云的天气或气溶胶密度低的环境下风廓线雷达的探测性能较低,误报率较高。同时微波气象雷达的体积较大,机动性差,距离分辨率差^[10]。相干多普勒测风激光雷达作为一种新兴光学遥感设备在晴空风场测量中发挥越来越重要的作用^[12-13]。激光雷达通过向大气中发射一束激光光束,通过检测大气中气溶胶粒子的光回波信号所产生的多普勒频移量,获得激光光束方向的径向速度。通过三维分解获得水平风场信息。相干激光雷达具有体积小、时空分辨率高、数据获取率高以及波长大

多处于人眼安全的红外波段等优点,但雨天以及潮湿条件下难以获得理想的测量效果。

美国的 Hannon. S. M 和 Thomson. J. A. L 等人利用相干多普勒激光雷达数据进行低空风切变监测、大气湍流强度计算和飞机尾流特性分析、研究等,验证了相干多普勒激光雷达系统用于在航空气象安全保障工作中应用的可行性^[14]。美国的相干公司(CTI)曾利用 10.6 μm 和 2.02 μm 的相干激光雷达用于丹佛国际机场风切变探测实验,为相干多普勒激光雷达系统商品化应用进程做出贡献。香港国际机场通过在机场跑道及飞机降落下滑道区域附近安装直接探测激光雷达、相干探测激光雷达、风廓线仪、天气雷达、气象浮标和自动气象站获取机场跑道及跑道附近区域上空准实时风场信息,通过下滑道扫描风切变识别算法(GLYGA, Glide-path scan wind shear alerts Generation Algorithm)和径向风速切变识别算法 RAGA (Radial Shear Alert Generation Algorithm) 等风切变判断准则对飞行器起降航道上可能发生的风切变事件进行预警,低空风切变的预警率达到 95%^[15-19]。法国 Leosphere 公司开发的 Wind-Cube 400S-AT 系统被应用于机场区域及其附近空域的低空风切变、风力发电机来风方向的切变等领域探测,开创了基于光纤技术的小型激光雷达系统用于航空气象安全保障的先河^[21]。近年来,越来越多的相干多普勒测风激光雷达系统被安放在国内外大型机场区域,作为一种可靠、安全的遥测设备,在三维风场和风切变的观测、大气湍流强度计算中发挥重要作用,在低空风切变预警、飞机尾流动态追踪和航空安全保障服务中发挥重要作用^[22-24]。目前,国内将相干多普勒测风激光雷达用于航空气象预报和航空安全保障的单位较少,2015 年开始中国海洋大学激光雷达课题组在北京首都国际机场和青岛流亭国际机场开展多次航空气象观测实验,并实现利用相干多普勒测风激光雷达的风廓线数据产品进行低空风切变提取以及利用激光多普勒雷达的谱信号进行飞机尾流定位和环量计算^[25]。

1 实验设置和数据获取

1.1 实验设置

中国海洋大学研制的脉冲相干多普勒测风激光雷达系统采用全光纤技术和快速数字信号处理技术,实现激光雷达系统的小型化以及实时显示风速数据结果的功能。此脉冲相干多普勒测风激光雷达系统具有空间分辨率高、测速精度高和数据更新快

等特点,使其满足小尺度、演变快的低空风切变探测需求^[18].相干多普勒激光雷达详细参数见表1.



图1 相干多普勒测风激光雷达在北京首都国际机场进行低空风切变观测现场图
Fig. 1 Coherent Doppler Wind Lidar configured at BCIA

表1 相干多普勒测风激光雷达系统参数
Table 1 Parameters of the Coherent Doppler Wind Lidar system

激光雷达发射系统参数	
激光波长	1.5 μm
单脉冲能量	150 μJ
脉冲宽度	200 ns
脉冲重复频率	10 kHz
激光雷达测量参数	
空间分辨率	15 ~ 30 m
径向探测范围	60 ~ 3 000 m
径向速度更新时间	0.1 ~ 1 s
PPI 扫描速度	20°/s (max)
扫描精准度	0.1°
速度测量范围	± 50 m/s
速度分辨率	0.1 m/s

2015年12月至2016年4月,中国海洋大学激光雷达课题组在北京国际首都机场开展了两次长时间连续低空风切变观测实验,实验数据记录了多次低空风切变过程以及低空天气过程.脉冲相干多普勒激光雷达放置于36L/18R跑道的36L端(如图2所示).不同于香港天文台在香港机场利用固定仰角的PPI扫描数据反演下滑道区域的风场信息,本文利用变仰角PPI扫描模式(step-wise Plane Position Indicator)测量下滑道区域的径向风速变化.

由于激光雷达的位置与36L/18R跑道的中心

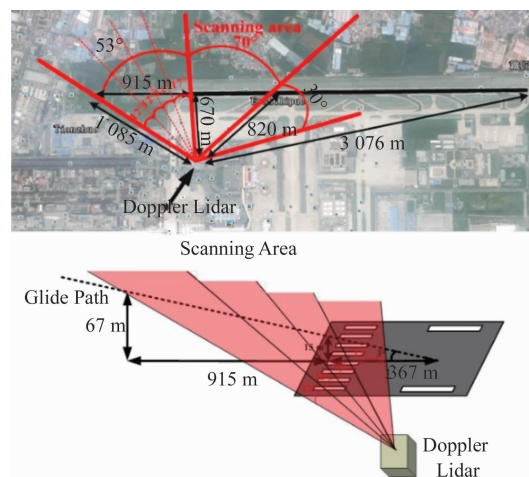


图2 相干多普勒激光雷达系统安放位置与扫描示意图
Fig. 2 Location and scanning strategies of CDL that configured at BCIA

线距离较远,很难通过一个固定的激光光束仰角完成整个飞机下滑道的风场信息扫描.因而在变仰角PPI扫描方式上采用多俯仰角设置,使得激光雷达的扫描区域能尽可能的接近飞机降落的轨迹,激光扫描平面与下滑道平面最大距离不超过10 m,而香港机场采用固定值1°俯仰角进行下滑道扫描测量,距离雷达距离越远,激光扫描平面与下滑道平面偏离越远,该变仰角PPI扫描获得的数据能够较为准确的揭示飞机在降落中所遭受到的真实风速变化,具体参数如表2所示.

表2 变仰角PPI方式下滑道扫描的详细参数
Table 2 Scanning patterns along the glide path

No	Elevation angle	Azimuthal angle
1	3°	207° to 219°
2	2°	219° to 231°
3	1°	231° to 243°
4	0°	243° to 260°

1.2 数据获取

相干多普勒测风激光雷达作为一种光学遥感设备,在晴空条件下的风场测量中发挥着越来越重要的作用.激光雷达通过向大气中发射一束激光光束,通过检测大气中气溶胶粒子光回波信号所产生的多普勒频移量,获得激光光束方向的径向速度.相干多普勒激光雷达采用变仰角PPI扫描的方式反演下滑道区域的风场信息.PPI扫描方式是3维扫描式激光雷达常用的一种扫描方式,具体操作是:通过固定激光雷达扫描光束的俯仰角,不断变化方位角实现扫描,激光光束的扫描区域为平面或者锥面区域.由于激光雷达数据中每个数据点是一片区域的风场信

信息的平均. 图 3 所示为 PPI 扫描中数据结果示意图. PPI 扫描中每个数据被称为一个距离库 (Range gate), 距离库的径向分辨率由激光雷达的脉冲宽度决定, 横向分辨率由数据的脉冲累加次数和扫描速度共同决定, 同时距离激光雷达越远横向分辨率越差. 由于激光雷达测量的是风速沿激光发射方向的径向分量, 当激光雷达扫描方向与主风向接近或者夹角接近 180° 时, 激光雷达的径向风速可近似表示为真实的大气水平风速; 当激光雷达扫描方向与主风向之间夹角较大时, 激光雷达的径向风速需要进行坐标变换才能得到真实的大气风场信息.

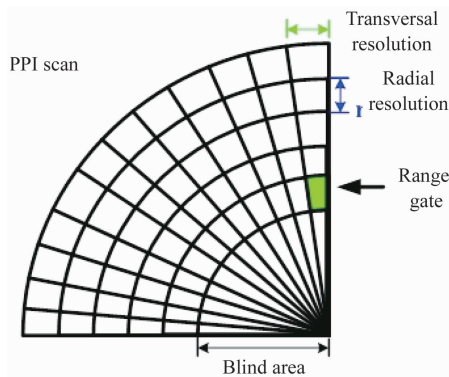


图 3 激光雷达 PPI 扫描模式测量风场信息原理示意图
Fig. 3 Scheme of wind field information retrieve from PPI scan data

将 PPI 扫描中靠近下滑道区域的径向数据经过质量控制后进行重组可以得到逆风廓线 (如图 4 所示). 逆风廓线反映的是沿飞机降落方向下滑道区域的风速即飞机降落时所能遭遇的风速的真实反映. 通过激光雷达下滑道扫描所构建的逆风廓线是下滑道中心线 30 m 左右的管道区域风速, 管道的尺寸与光束和下滑道夹角以及数据距离库有关. 在反演逆风廓线时, 需要进行严格的质量控制, 消除由于某些测量点信号质量不高导致产生风切变误报的可能性; 同时需要结合当时主风向对径向风速进行坐标投影, 得到真实的逆风廓线.

2 数据分析和讨论

2.1 低空风廓线数据

低空风廓线是低空风速随高度变化的曲线, 风廓线被广泛用来研究大气边界层内的风速规律, 中国海洋大学开发了利用长时间序列的低空风廓线数据识别低空风切变算法, 并于 2015 年 4 月在北京首都国际机场进行验证^[19]. 10 min 平均风廓线数据,

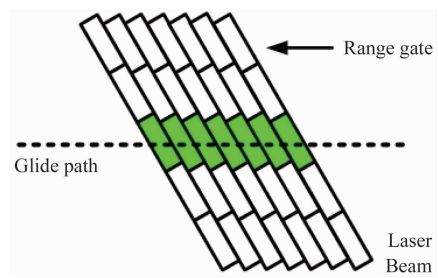


图 4 利用 PPI 扫描反演逆风廓线原理示意图
Fig. 4 The schematic diagram of inverting head-wind profiles using PPI scan

可以有效排除持续时间较短的湍流对风廓线数据造成影响, 适用于背景风场变化的分析, 而 1 min 平均风廓线数据可以较为准确的反映风速瞬时变化, 在之前的研究中已经探究过利用低空风廓线进行低空风切变的方法. 利用低空风廓线进行垂直风切变判断的准则主要有: 1) 在垂直高度 30 m 内, 风速变化超过 2.33 m/s ; 2) 在背景风速超过 12.5 m/s 的条件下风速变化超过 3.5 m/s ^[1].

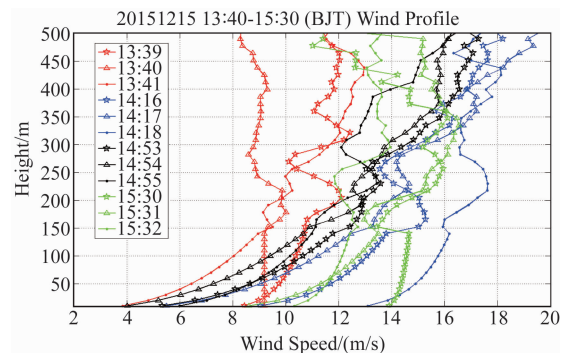


图 5 2015. 12. 15 激光雷达测量得到北京首都机场附近 1 min 平均风廓线图
Fig. 5 1 min averaged wind profiles at BCIA obtained by CDL on 2015. 12. 15

图 5 为相干多普勒激光雷达测量得到的北京首都国际机场 2015 年 12 月 15 日 13:39 ~ 15:32 之间 10 ~ 500 m 高度内 1 min 平均风速廓线, 图 5 中 150 m 高度之下为利用指数函数对激光雷达测量盲区内的风速进行拟合得到, 其中为激光雷达测量得到风廓线的高度, 为高度处的风速, 为 Hellman 指数. 由于激光雷达采用多种测量模式进行观测, 所以风廓线数据的时间不连续, 而从图中的风廓线数据可得出此段时间内首都机场附近空域背景风的强度有剧烈变化. 在此时间内, 风速的最大变化值达 11 m/s , 发生在高度 500 m 处; 在 150 ~ 300 m 高度的空域风速随时间变化较大, 最大变化值为 8.5 m/s , 达到垂

直风切变的判断准则. 在 13:39 ~ 13:41 间, 同一时刻内风速随高度变化较小, 高度 300 m 处风速变化最为剧烈, 风速由 12.5 m/s 减小至 9 m/s 随后又增大至 12 m/s; 在 14:16 ~ 14:18 间, 背景风强度逐渐增强, 同一时刻内风速随高度变化较大. 高度 250 m 处风速变化最大, 其差值为 4 m/s. 在 14:53 ~ 14:55 之间, 同一时刻风速随高度变化较大, 在利用指数函数对低空风廓线进行拟合时, 低空风速梯度较大, 相比于 15:30 ~ 15:32 间, 风速处于较高水平, 而同一时刻风速随高度变化梯度较小, 导致拟合时 Hellmann 指数较大. 在近地面区域内, 利用指数函数进行拟合时需要综合考虑地表粗糙度和 Prandtl 层的热稳定性, 同时, 小尺度湍流对于指数函数拟合影响较大, 因此在数据更新率较高的数据产品中需要慎重使用, 但在较长时间平均的廓线拟合中可以适当采用此种方法. 通常草地的幂指数为 0.16, 近地面的高大建筑物和树木的阻挡以及地表摩擦导致低空风速损失较大进而产生的低空风切变, 该类型风切变主要发生在距离地面高度 150 m 之内, 而发生在高度 200 ~ 300 m 范围内的水平风的垂直切变可能由于大气不稳定的热结构和大尺度大气湍流引起.

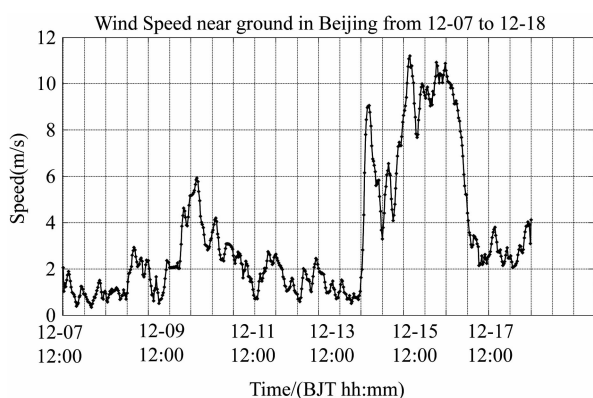


图6 北京市自动气象站测量的2015年12月07日至12月18日地面10 m高度处风速信息

Fig. 6 The information of wind speed obtained by automatic meteorological station at Beijing (39.93N 116.28E) from Dec 07th to Dec 18th, 2015

自动气象站被广泛用于大气温度、风向、风速、气压、能见度等气象要素的全天候现场监测. 自动气象站测量得到的风速和风向信息为地表高度 10 m 处的风速和风向. 本文记录了北京市自动气象站 (39.93N 116.28E) 观测得到 2015 年 12 月 07 日至 12 月 18 日 24 时的风速绘制成时间序列图, 如图 6 所示. 从风速图可以看出, 在 2015 年 12 月 15 日

12:00 至 15:00 时间段内, 地表 10 m 高度处的风速从 4 m/s 增加至 11 m/s. 而图 5 所示的低空风廓线数据正是激光雷达于此段时间内所获得, 在 150 ~ 600 m 高度范围内风速的最大跨度达 10 m/s, 高空风速也经历增大的过程; 利用指数风廓线拟合得到的 10 m 高度处的风速由 4 m/s 增大到 14 m/s. 通过与自动气象站的数据对比, 得出激光雷达数据与自动气象站数据在观察大尺度天气过程方面具有很好的一致性. 不同于自动气象站只提供地表高度 10 m 处的风速, 激光雷达不仅可以提供盲区之外的风速垂直廓线, 还可以进一步提供从秒级数据至或 10 min 平均等多种数据产品, 满足水平风垂直切变判断的需求.

2.2 下滑道扫描提取逆风廓线

激光雷达的 PPI 扫描测量模式可以通过扫描获得目标区域内的风场进而可以实现分析目标区域内部的湍流的动态定位和尺度分析. 图 7 为 2015 年 12 月 15 日利用变仰角 PPI 扫描模式得到的下滑道区域的风场信息. 图中颜色表示风速大小, 红色表示风速为正, 此时风向为远离激光雷达, 蓝色表示风速为负, 即风吹向激光雷达. 图中黑色直线表示飞机下滑道, 中间黑线是首都国际机场 36L/18R 跑道中心线的延长线, 考虑到飞机降落过程中飞行轨迹的不确定性, 其余两条黑线为距离中心线 50 m, 宽 100 m 的下滑道区域为重点观测区域. 通过图 7 可以看出 PPI 扫描区域内存在速度较大的气团, 而这些气团以不同的速度经过下滑道区域.

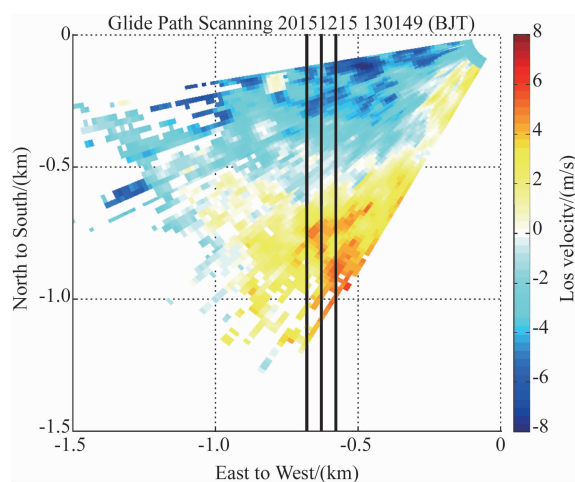


图7 2015年12月15日激光雷达测量得到北京首都机场36 L下滑道端低空风速图

Fig. 7 The low altitude wind speed of the glide path at 36 L end of BCIA obtained by CDL on 2015. 12. 15

为了研究下滑道区域的风切变, 将下滑道区域

的风速提取出来,按照到达下滑台的距离进行排列,形成逆风廓线.逆风廓线可以真实的反映飞机在经过下滑道区域时所能感受到的风速.图 8 为利用图 7 中下滑道扫描数据得到的逆风廓线,由于两个气团的存在使得此逆风廓线的最小值和最大值之差约为 18 节,超过国际民航组织给出的 15 节风切变预警值.

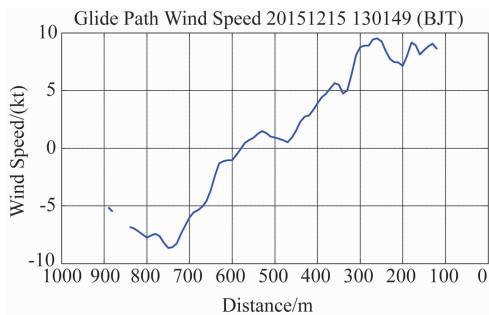


图 8 通过 PPI 扫描测量数据提取得到飞机下滑道处的逆风廓线
Fig. 8 Headwind profile retrieved from the PPI scan of glide path at 36 L end

仅通过最大值和最小值之间的差值进行下滑道风切变的预警在某些特殊情况下会产生很大的误差.比如,飞行员向飞行管制部门报告风切变案例具有很大的主观性,当最大值和最小值之间的距离很远时,飞机经过此段距离飞行员有充足的时间进行操作,驾驶技术过硬的飞行员感受到风切变可能没有那么剧烈.1983 年 Woodfield 和 Woods 发表文章阐述利用风切变强度因子进行逆风廓线的风切变判断,风切变强度因子 I 的计算公式如下:

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

其中, $\frac{dV}{dt}$ 是风速的变化率, ΔV 是距离范围内风速的变化值, V_{app} 是飞机标准进近速度,通常为 75 m/s. 在观测中,风速在 500 m 的范围内变化 18 kt, 利用式(1)可得风切变强度为 0.08^[26-27]. 风切变强度因子的立方根被近似看做湍流强度,国际民航组织规定的中等强度湍流为 0.3~0.5,重度湍流为 >0.5,而本文所选时刻的湍流强度为 0.44,属于中等强度的湍流强度.根据空中管制部门的风切变报告,在 2015 年 12 月 15 日 13:02 有飞行员报告遭遇风切变,并复飞以躲避风切变.

2.3 下滑道扫描中识别风切变

通过分析某一时刻的下滑道扫描可以得出该时

刻的下滑道逆风廓线,进而可以计算得到风切变强度因子.而通过分析时间序列的下滑道扫描结果,可以研究出此下滑道区域的风切变形成原因和风切变影响范围.图 9 为 2016 年 2 月 28 日 12:29 至 12:34 间下滑道扫描观测到一个气团经过下滑道的过程.12:29 时通过 PPI 扫描数据可以看出下滑道区域风场较为均匀,至 12:30 时下滑道区域出现速度为 8 m/s 左右的横向运动气团由西向东经过下滑道区域,12:31 时气团中心处于下滑道区域,并在 12:32 时气团经过下滑道区域.整个气团经过下滑道区域历时数分钟.由历史气象资料统计可知,首都机场区域春季盛行西北风,由连续的 PPI 扫描图可以得出气团由西向东经过下滑道区域,考虑到首都机场周围地形和周围建筑的因素,认为该处的气团主要受 36L/18R 跑道周围的高大建筑物和树木影响导致.

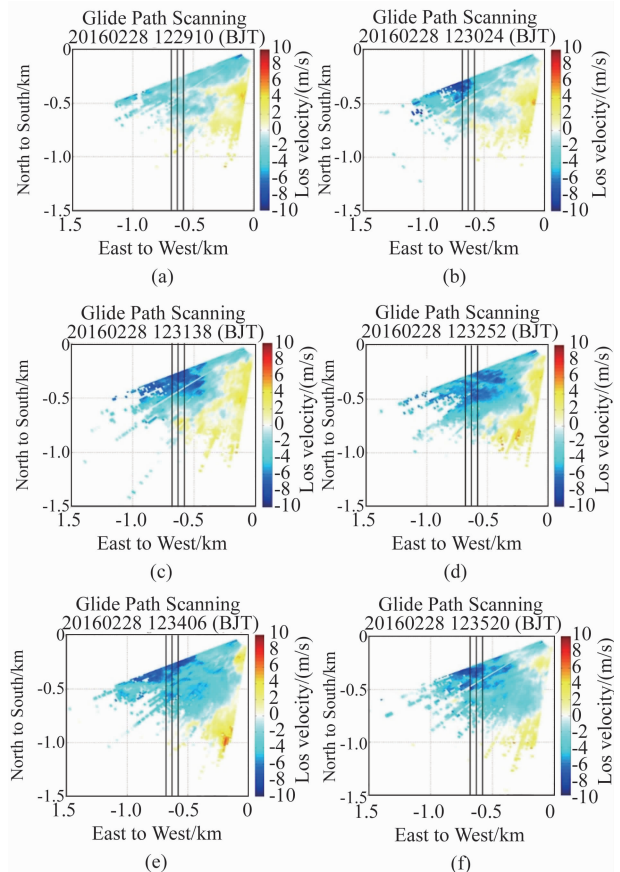


图 9 2016 年 2 月 28 日下滑道扫描模式观测到风切变演变过程
Fig. 9 A wind shear event identified by the glide path scan at Feb 28th, 2016.

连续时间序列的 PPI 扫描结果不仅可以监测大速度的气团穿越下滑道区域而且可以用作监测背景风场的风向转变和风速变化情况. PPI 扫描测量所

得到的径向风速是背景风场的风速在激光雷达激光光束方向的分量,因而速度值会有正负之分,当激光光束与风向垂直时,风速为0,因而通过激光雷达的零风速线可以大致确定出背景风场的主风向.图10为2016年2月28日下午激光雷达观测到下滑道区域风向转变和风速增强的案例.图中每个PPI扫描数据间隔为5分钟,图a可知零风速线约为 200° (假定北方向为 0° 顺时针旋转)可知背景风场的主风向约为 290° 左右;图b中零风速线约为 240° ,可知背景风场的主风向约为 330° ,之后的PPI扫描图中零风速线的变化不大,风向稳定在 330° 左右.图b至图f的背景风向大致相同,而风速则有很大差距,图b中最大径向风速为 8 m/s ,图c和图d中径向风速要高于图b中的径向风速,而图e和图f中的最大径向风速达到 13 m/s .通常来说,PPI扫描测量数据可以利用VAD(Velocity Azimuth Display)方法进行风场的反演,获得平均风矢量从底层到高层垂直廓线图,但是不能给出详细的风场空间分布.通过零风速线判断主风向的方法适用于风向变化较大的情况下定性分析,对于研究气团的来向以及背景风场具有重要意义.

中国海洋大学激光雷达课题组自2015年开始在北京首都国际机场利用多种测量模式开展过多次低空风切变观测实验,并且开发利用了不同观测模式对风切变进行监测.图11给出2016年2月28日激光雷达采用逆风廓线阈值法判断风切变的时刻,图中黑色圆圈标注出气团的位置信息.由图11可知12:30至14:46这段时间内风切变的案例较多,与图6的地面自动气象站观测资料对应可以发现这段时间背景风有增大趋势,同时可以得出激光雷达数据与自动气象站数据在观察天气过程方面具有很好的一致性.

由于飞行员向空中管理部门报告风切变案例具有很强的主观性,这会影响激光雷达系统风切变预警工作的准确率.因而,激光雷达系统用于低空风切变的观测研究不仅需要准确测量下滑道区域的风场信息,还要完成风切变强度与飞行员报告之间满足的统计工作,只有综合考虑诸多因素才会提高激光雷达系统进行低空风切变预警工作的准确性.

2.4 激光雷达风羽图识别小尺度天气过程

图12表示2016年2月28日凌晨0:00至5:00激光雷达利用5波束模式得到的首都机场附近风廓线风羽图,图中风杆表示风向;风羽和风羽颜色表示

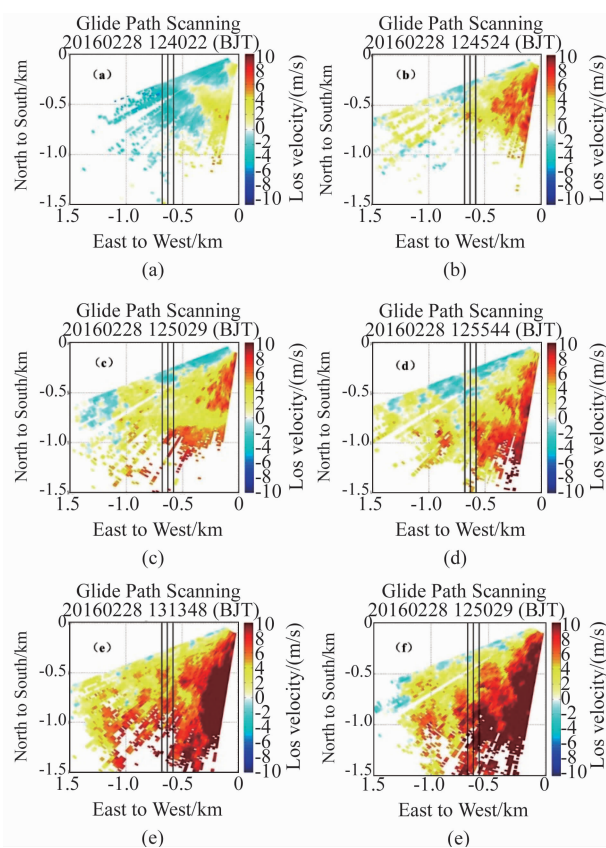


图10 2016年2月28日12:40-13:20激光雷达PPI模式扫描结果序列

Fig. 10 PPI scan series from 12:40 to 13:20 at Feb 28th, 2016.

风力等级.从图12中可知,首都机场附近低空为西北风,随着高度增加风向逐渐转变,在高度 600 m 至 1000 m 变为东风甚至东南风.在高度 300 m 至 400 m 出有较长持续时间的弱风区域,此高度随时间变化相对稳定.同时此弱风高度之上风速较高,在风速梯度较大的区域极易产生风切变.激光雷达的风羽图数据可以探测小尺度的湍流及天气现象,为晴空条件下分析垂直方向的风切变提供了有效的手段.

激光雷达将大气中的气溶胶粒子作为示踪粒子,示踪粒子的浓度会影响到激光雷达数据的信噪比进而影响到激光雷达的测量范围.中国海洋大学激光雷达课题组曾运用梯度法、方差法等分析相干多普勒测风激光雷达的信噪比数据研究进行大气边界层研究.图12中自2:00至4:00激光雷达的测量距离变短,排除激光雷达自身存在故障的可能性,主要原因是由于质量控制中信噪比的降低造成探测距离的变短,同时反映了此段时间边界层在持续降低.

3 结论

相干多普勒测风激光雷达多种测量模式的数据

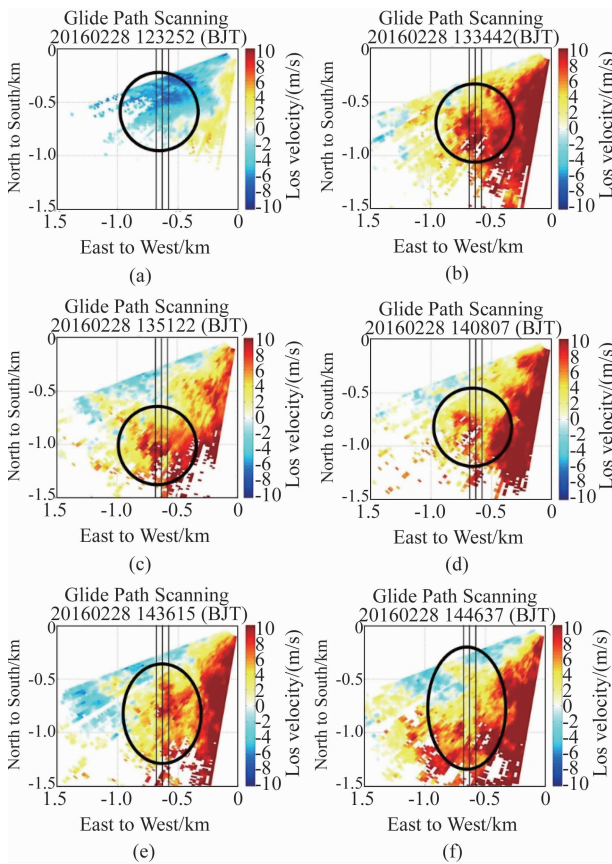


图 11 2016 年 2 月 28 日激光雷达 PPI 扫描模式中识别的风切变时刻图
 Fig. 11 Wind shear events identified by the glide path scan on Feb 28th, 2016.

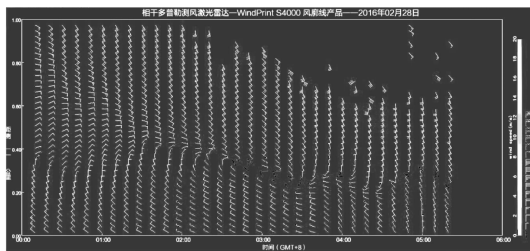


图 12 2016 年 2 月 28 日凌晨 0 点至凌晨 5 点北京机场附近区域低空风羽图
 Fig. 12 Wind barbs obtained by CDL configured at BCIA from zero to five on Feb 28th, 2016.

均可用作机场及其附近空域的低空风切变监测,通过科学、快速、准确的分析,可以实现对机场区域低空风切变的预警.通过设置更为靠近飞机下滑道倾斜平面的激光扫描区域方案,获得较为准确的飞机下滑道风场信息,为精确反演下滑道逆风廓线提供可靠保证.通过风切变强度公式对下滑道逆风廓线进行遍历,可获知风切变强度最大的区域.激光雷达

在利用 PPI 扫描反演下滑道风场时易受到背景风的主风向和激光雷达与跑道的相对位置影响.通常来说,激光光束与跑道夹角小于 30°时可以作为反演逆风廓线,同时也与机场附近盛行风向与跑道之间的夹角有关.通过分析 PPI 扫描数据序列可获得中小尺度气团经过下滑道路径,对于分析下滑道区域低空风切变成因提供参考.激光雷达的下滑道扫描模式监测风切变可以弥补激光雷达风廓线测量模式只适用于大尺度、中尺度的天气过程探测的不足,实现对低空风切变进行综合观测.由于低空风切变的类型多、持续时间短,对于准确探测、识别和预警提出很高的要求,中国海洋大学激光雷达课题组利用短距相干激光雷达的多种测量模式实现机场附近低空风切变的探测,并不断探索低空风切变的预警工作.

致谢

实验工作得到波音公司的项目支持,风场反演方法得到国家自然科学基金(41375016, 41471309)和国家 863 计划(2014AA09A511)的支持.感谢于晓庆、刘晓英等同学在数据处理工作中的帮助以及王瑞在现场观测实验中的付出.感谢青岛镭测创芯科技有限公司的王希涛、戚一麟在现场观测实验中的大力帮助.感谢中国海洋大学激光雷达课题组全体成员在本次实验中的支持和帮助.

References

[1] ICAO. *Manual on low-level wind shear* [M]. International Civil Aviation Organization, 2005: 1-1.
 [2] Federal Aviation Administration. *Wind Shear* [M]. FAA-P-8740-40-AFS-8. 2008.
 [3] Storm B, Basu S. The WRF model forecast-derived low-level wind shear climatology over the United States Great Plains [J]. *Energies*, 2010, 3(2):258-276.
 [4] WANG Q M, GUO L L. Development of lidar in detection of low altitude wind shear [J]. *LASER and INFRARED*. (王青梅,郭利乐. 激光雷达在机场低空风切变探测中的应用. *激光与红外*). 2012, 42(12): 1324-1328.
 [5] DAI L L, NI X W. Research of Doppler Lidar for Microscale Wind shear-field Detection [D]. Nanjing University of Science and Technology. (戴丽莉,倪晓武. 探测微尺度风切变场的多普勒激光雷达研究. 南京理工大学). 2010.
 [6] International Civil Aviation Organization (ICAO). ICAO Safety Report 2015 Edition.
 [7] International Civil Aviation Organization (ICAO). ICAO Safety Report 2016 Edition.
 [8] LIU Y H, LI F Y, ZHANG H Y, et al. The comparison between sonic-anemometer and three-component propeller anemometer [J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instrument*. (刘艳华,李富余,张宏升,等. 超声风速仪与三轴风速仪测风的比较研究. *气象水文海洋仪器*),

- 2003, **3**: 7 – 16.
- [9] Anfossi D, Oetl D, Degrazia G, *et al.* An analysis of sonic anemometer observations in low wind speed conditions [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, **114**(1): 179 – 203.
- [10] Armijo L. A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radars [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1969, **26**(3): 570 – 573.
- [11] WENG N Q, XIAO L M, GONG Z B, *et al.* The theory and experimental verification of 915 M microwave radar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*. (翁宁泉, 肖黎明, 龚知本, 等. 915 M 微波测风雷达原理及实验对比. *量子电子学报*), 2001, **18**(1): 92 – 96.
- [12] Wu S, Yin J, Liu B, *et al.* Characterization of turbulent wake of wind turbine by coherent Doppler lidar [J]. *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics*, 2014: 92620H-92620H-10.
- [13] Wu S, Liu B, Liu J, *et al.* Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(10): A762 – A780.
- [14] Hannon S M, Thomson J A L, Henderson S W, *et al.* Wind shear, turbulence, and wake vortex characterization using pulsed solid state coherent lidar [J]. *Air Traffic Control Technologies*. 1995, **2464**: 94 – 102.
- [15] Chan P W, Lee Y F. Application of short-range lidar in wind shear alerting [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012. DOI: 10.1175/JTECH-D-11-00086.1
- [16] Chan P W, Shun C M, Wu K C. Operational LIDAR-based system for automatic wind shear alerting at Hong Kong International Airport [C]. 12th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, American Meteorological Society, Atlanta, GA, USA, 2006.
- [17] Hong Kong observatory. Wind shear and turbulence in Hong Kong-Information for pilots [J]. *Hong Kong Observatory and International Federation of Air Line Pilots Associations*. 2005.
- [18] Shun C M. Ongoing research in Hong Kong has led to improved wind shear and turbulence alerts [J]. *International Civil Aviation Organization (ICAO) journal*, 2003, **58**(2): 1 – 9.
- [19] 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**: 637 – 655.
- [20] Wagner R, Courtney M, Gottschall J, *et al.* Accounting for the speed shear in wind turbine power performance measurement [J]. *Wind Energy*, 2011, **14**(8): 993 – 1004.
- [21] Antoniou I, Pedersen S M, Enevoldsen P B. Wind shear and uncertainties in power curve measurement and wind resources [J]. *Wind Engineering*, 2009, **33**(5): 449 – 468.
- [22] Chan P W. Latest aviation applications of LIDAR at the Hong Kong International Airport [C]. 15th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. 2011.
- [23] Choy B L, Lee O S M, Shun C M, *et al.* Prototype automatic LIDAR-based wind shear detection algorithms [C]. 10th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. 2004.
- [24] JIANG Li-Hui, YAN Yan, XIONG Xing-Long, *et al.* Doppler lidar alerting algorithm of low-level wind shear based on ramps detection [J]. *Infrared and Laser Engineering* (蒋立辉, 闫妍, 熊兴隆, 等. 基于斜坡检测的多普勒激光雷达低空风切变预警算法. *红外与激光工程*), 2016, **45**(1): 106001 – 106001(7).
- [25] YIN Jia-Ping. Research and observation of turbine wake and wind field of MABL by coherent Doppler wind lidar. (尹嘉萍. 风机尾流场与海气边界层风场的多普勒激光雷达观测研究. *中国海洋大学*), 2015.
- [26] Woodfield A A, Woods J F. Wind shear from headwind measurements on British Airways B747-236 aircraft [J]. *Royal Aircraft Establishment Bedford*, 1981.
- [27] Woodfield A A, Woods J F. Worldwide experience of wind shear during 1981-1982 [R]. *Royal Aircraft Establishment Bedford (England)*, 1983.

(上接第 467 页)

- [37] LI Xin, LIU Shao-Min, MA Ming-Guo, *et al.* HiWATER: An integrated remote sensing experiment on hydrological and ecological processes in the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science* (李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计. *地球科学进展*), 2012, **27**: 481 – 498.
- [38] JIN Rui, LI Xin, YAN Bao-Ping, *et al.* Introduction of eco-hydrological wireless sensor network in the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science* (晋锐, 李新, 阎保平, 罗万明, 等. 黑河流域生态水文传感器网络设计. *地球科学进展*), 2012, **27**: 993 – 1005.
- [39] Choi M, Kustas W P, Anderson M C, *et al.* An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (iowa, us) during smacex [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**: 2082 – 2097.
- [40] Gonzalez-Dugo M P, Neale C M U, Mateos L, *et al.* A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**: 1843 – 1853.
- [41] Huang C, Li Y, Gu J, *et al.* Improving estimation of evapotranspiration under water-limited conditions based on sebs and modis data in arid regions [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**: 16795 – 16814.
- [42] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, *et al.* Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **49**: 246 – 263.
- [43] Zhang R H, Sun X M, Wang W M, *et al.* An operational two-layer remote sensing model to estimate surface flux in regional scale: Physical background [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2005, **48**: 225 – 244.