

文章编号 1004-924X(2018)04-0927-09

测风激光雷达修正 F 因子的小尺度风切变检测算法

陈 星^{1,4*}, 李 贞², 庄子波³, 熊兴隆²

(1. 中国民航大学 民航空管研究院, 天津 300300;

2. 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;

3. 中国民航大学 飞行技术学院, 天津 300300;

4. 中国民航大学 空管运行规划与安全技术重点实验室, 天津 300300)

摘要:针对由复杂地形或地理环境等因素诱发范围小但强度大的晴空风切变无法被已有风切变算法检测的问题, 提出一种测风激光雷达修正 F 因子来检测这种小尺度风切变的算法。将传统 F 因子中雷达无法直接测量的垂直风速分量通过理论模型转换为径向风速梯度的函数, 将解算 F 因子的关键点落在得到径向风速梯度的问题上。先从晴空风场数据中提取出激光雷达下滑道扫描的风速廓线, 再用最小二乘法计算风速廓线的径向梯度, 进一步求解得到修正后的 F 因子, 并根据其经验阈值来判别风切变, 最后使用香港国际机场提供的实测激光雷达风场数据进行了实验验证。实验结果表明, 当风切变范围在 400~800 m 时, 该算法能够检测出现有斜坡算法无法检测到的小尺度风切变, 并将小尺度风切变检测范围扩大 2 NM。该方法利用地面激光雷达数据来衡量机载指标变化, 并在检测几百米的小尺度风切变方面效果明显, 对于降低风切变漏报率和提高风切变预警率都具有重要意义。

关键词:径向风速梯度; 小尺度风切变; 下滑道扫描; 激光雷达

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182604.0927

A small scale wind shear detection algorithm of modified F-factor for wind-profiling lidar

CHEN Xing^{1,4*}, LI Zhen², ZHUANG Zi-bo³, XIONG Xing-long²

(1. Civil Aviation Air Traffic Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. Flight Technology College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

4. Key Laboratory for Act Operation Planning and Safety Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

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

Abstract: Aiming at the problem that a small but strong clear sky wind shear induced by the complex terrain or geographical environment and other factors cannot be detected by the existing wind shear detection algorithm, a small scale wind shear detection algorithm of lidar's modified F factor was put

收稿日期: 2017-07-13; 修订日期: 2017-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. U1433202); 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB0502401)

forward. The vertical wind speed component that could not be directly measured by lidar in traditional F-factor was converted into radial wind speed gradient by theoretical model, thus the key point for solving the F-factor fell on the way to obtaining the radial wind speed gradient. Firstly, the wind speed profile of lidar glide-path scanning was extracted from the clear sky field data. Then, by using the least squares method, radial gradient of the wind speed profile was calculated, and the modified F-factor was solved thereby, and the wind shear was determined according to its empirical threshold. Finally, the actual lidar wind field data provided by the Hong Kong International Airport were used for experimental verification. The experimental results show that when the wind shear in the range of 400m to 800m, the algorithm can detect the small scale wind shear which fail to be detected by the existing ramps algorithm, and enlarge the detection range for 2NM. The method proposed uses the ground lidar data to measure the change of the airborne index and has obvious effect in detecting the small scale wind shear of several hundred meters, which makes sense for reducing the missing report rate of the wind shear and improving the wind shear rate.

Key words: radial wind speed gradient; small scale wind shear; glide-path scanning; LIDAR

1 引言

风切变是指一定距离内气流运动速度和方向发生无规则骤变的现象,天气学中将水平空间尺度在 200 m~2 km 的天气系统定义为小尺度天气系统^[1]。小尺度风切变因其变化时间短、作用范围小及影响强度大等特点被称为飞行界的“隐形杀手”,低空小尺度风切变更是威胁着航空器在起降阶段的飞行安全。因此如何有效且准确地检测出低空小尺度风切变发生位置成为保障民航飞行安全亟待解决的问题。

现今国内绝大部分机场都配备有气象雷达,因此对低空风切变的探测依赖于气象雷达的回波数据^[2-3]。然而气象雷达是通过接收大气中云雨粒子对无线电波的反射回波来探测风场,在晴空天气条件下,气象雷达收到的回波强度较弱,因此无法实现对低空风切变的检测。

随着激光雷达技术^[4-6]的迅速发展,激光多普勒雷达以其高精度、高分辨率及能提供三维风场信息等特点成为了晴空天气下探测低空风切变最为有效的工具之一。近几年国内外对多普勒激光雷达的研究成果也日新月异,大致可以分为两个方面的研究进展。在改进激光雷达硬件探测系统研究方面,2014 年 Cyrus F. Abari 等研究了一种全光纤镜像抑制零差的多普勒风切变雷达^[7],提高了零点附近风速测量的可靠性,并抑制了多源噪声。2015 年 4 月中科大孙东松课题组对 1.55 μm 波段全光线脉冲相干测风激光雷达^[8]的样机

进行了研制,探测距离 3 km,距离分辨率 60 m,风速测量精度为 0.5 m/s,测量范围为 ± 30 m/s,时间分辨率为 1 s。在激光雷达风切变预警算法方面,2015 年 9 月,香港天文台陈柏纬等研究了香港机场边界层中地形诱导风切变的观测与数值仿真,针对特有地形对风切变的诱导进行观测^[9],并结合了背景气象特点,不足之处是只能针对下击暴流这种类型的切变,并不具备普遍适用性。2016 年 1 月,蒋立辉、闫妍等^[10]提出了使用单双斜坡算法来预警低空风切变,但这种检测方式只适用于预警大尺度低空风切变。风切变危险因子^[11-13]由径向风速梯度和垂直风速分量两部分组成,国际上规定 F 因子确定危险的边界为,当超过时,系统必须发出风切变告警。香港国际机场首次提出使用基于激光雷达数据的 F 因子来检测低空风切变,由于垂直风速分量与雷达波束指向垂直,激光雷达无法直接测量,因此计算过程中忽略了垂直风速分量的影响^[14-16],使得计算值远小于国际上公认阈值而造成经验阈值不明确的问题。

本文运用理论模型将垂直速度分量转换为径向风速梯度的函数,提出一种修正 F 因子来检测低空小尺度风切变的算法。首先,提取激光雷达下滑道扫描方式下获取的有效晴空风场数据,接着在雷达距离分辨率内挑选离飞机下滑道最近的数据进行重构得到风速廓线,用最小二乘法计算下滑道风速廓线的径向梯度,最后计算修正 F 因子并使用国际上规定的经验阈值进行低空小尺度风切变的检测。

2 建立下滑道风速廓线

2.1 测风相干激光雷达

2002年香港国际机场引进了首部测风激光雷达,利用接收的后向散射回波信号与本振信号的光频率差来间接探测雷达径向的大气风速,2006年又引进第二部相同的激光雷达并于2008年启用了双激光雷达风切变告警系统,此外香港国际机场开创性增加了下滑道扫描方式并应用于实际激光雷达工作模式中。本文实验中所应用的风场数据来源于香港国际机场的多普勒激光雷达,采用下滑道扫描策略^[17],使用波长为的红外线扫描,脉冲重复频率为500 Hz,扫描速率为每秒。其他基本扫描参数^[17-18]见表1。

表1 激光雷达下滑道扫描基本参数

Tab.1 Glide path scanning parameters of LIDAR

The Max unambiguous velocity/(m · s ⁻¹)	The spatial resolution/m	The measurement distance/m
20~40	100	400~1 000

2.2 下滑道有效风场数据提取

香港国际机场在引进第一部多普勒激光雷达时,可以使用的扫描模式只有PPI和RHI,前者探测方式是固定仰角动方位角,方位角变化范围为,用于掌握整个机场升降区的风场变化情况;而后者则是固定方位角动仰角,仰角变化范围为,用于监控与该固定方位角垂直面上径向风场变化情况。随后引进第二部激光雷达后,对这台设备创新性地采用了下滑道扫描模式,下滑道定义为跑道末端航向信标提供航向面和跑道始端下滑信标提供下滑面的相交线,因此这是一种集中探测飞机起降区域风速的扫描方法。仰角和方位角同时沿着飞机升降轨迹在变化,下滑道扫描的数据更新时间为2 min左右,比传统的PPI扫描一次的时间减少了4 min,数据的及时更新有利于降低风切变的漏报率。飞机进场和离场时下滑道的仰角是不同的,起飞离场时下滑道与跑道夹角为6°,而进场则是3°,以飞机进场为例得到下滑道扫描情况如图1所示。

图1中,C点为测风激光雷达安放位置,A点

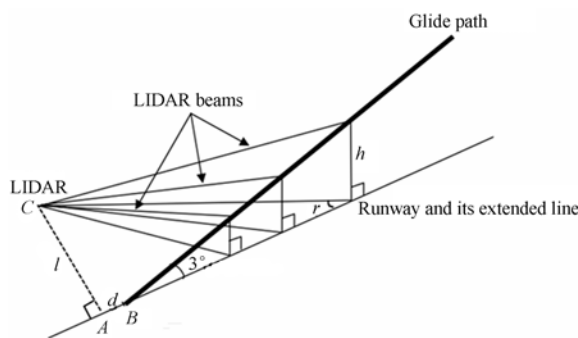


图1 飞机进场下滑道扫描示意图

Fig.1 Schematic diagram of a glide-path scan for approaching

为雷达到跑道距离的垂足,B点为飞机在跑道上的着陆点。先以C点为原点建立坐标系,将通过下滑道扫描方式得到的雷达径向风速点坐标由球坐标系转到直角坐标系中。再提取以下滑道为中心左右水平距离范围为300 m,上下垂直距离范围为60 m的管状区域内的风速数据,最后选择激光光束在跑道面内投影线与跑道夹角小于30°的数据作为下一步重组风速廓线的有效风速点。

根据上述的选点原则,在直角坐标系下,C点为坐标原点,CA为x轴,y轴与AB平行方向,z轴垂直于xoy平面,则有效风速点在3个轴上的坐标范围分别是:

$$\begin{cases} l-150 \leq x \leq l+150 \\ \frac{l}{\tan 30^\circ} \leq y \leq \frac{l}{\tan r} \\ \sin r = \frac{l}{L_{\max}} \\ -30 \leq z-h \leq 30 \\ h = (y-d) \tan 3^\circ \end{cases}, \quad (1)$$

对照图1,式(1)中l表示C点到A点的距离;d表示A点到B点的距离;r表示能探测的最远激光光束与跑道方向的夹角;L_{max}表示激光光束最远探测距离;h表示下滑道上风速点到y轴的距离。

2.3 下滑道风速廓线重构

在已经建立的直角坐标系中,下滑道平行于yoz平面,可以表示成一条过点(l, d, 0),且直线斜率为tan 3°的直线,得到直线方程为:

$$\begin{cases} x=l \\ y = \frac{z}{\tan 3^\circ} + d \end{cases} \quad (2)$$

提取得到的有效风速点是下滑道附近一系列离散点,接着利用这些风速点进行下滑道风速廓线重组。首先,以距离分辨率为单元网格划分下滑道,接着根据公式(2)可以求得下滑道上以距离分辨率为单位的各点三维坐标值 (x_0, y_0, z_0) ,在单元网格内计算各点到下滑道上已知点的距离值,保留距离值最小所对应的风速数据点,最后由这些经筛选保留下来的风速点组成下滑道处的风速廓线。

3 修正 F 因子的风切变检测算法

产生风切变的原因主要有两大类,一类是大气运动变化本身造成的,另一类则是复杂地理、环境因素所造成的。现有的单双斜坡预警算法是根据斜坡长度和风速变化量来判断风切变局部最强风切变发生的中心位置,但这种算法只适用于预警较大尺度的低空风切变。对于由复杂地形或环境因素引发气流扰动所带来的小尺度低空风切变,可以考虑用修正后 F 因子的变化来检测。

1990 年 RL. Bowles 结合飞行动力学和风切变理论知识,提出使用 F 因子对风切变进行检测^[19]。F 因子的物理意义在于反映变化风场对飞机飞行过程中总能量影响程度,F 因子的数值越大,表明风切变对飞机飞行的危害就越大。飞机的质心在风场中运动情况如图 2 所示,飞机在飞行过程中,除了受发动机提供的推力 T 和自身的重力 W 作用之外,还有外界风场对飞机产生阻力 D 以及由此获得飞行的升力 L 。

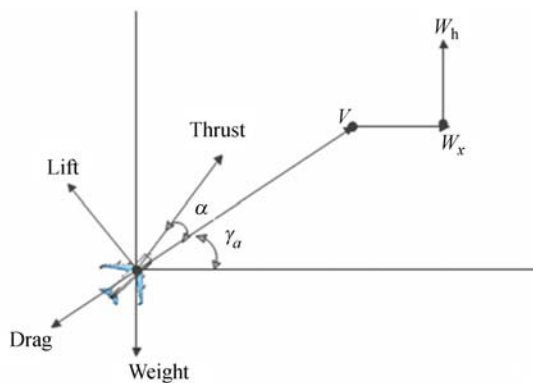


图 2 飞机质心在风场中运动情况

Fig. 2 Movement of aircraft's centroid in wind field

在变化风场中,飞机质心动力学方程^[20]为:

$$m(V+W_h \sin \gamma_a + W_x \cos \gamma_a) = T \cos \alpha - D - mg \sin \gamma_a, \quad (3)$$

式中: W_x 、 W_h 分别为水平风速分量和垂直风速分量; T 为发动机推力, D 为飞机升力, V 为飞机速度, m 为飞机质量, g 为重力加速度; γ_a 为航迹角, α 为推力矢量与航迹之间的夹角。辅助动力学方程^[21]为:

$$H = V \sin \gamma_a + W_h, \quad (4)$$

H 为飞行高度,能量变化率是评定飞机能量特性的一个指标,其表达形式为:

$$\dot{H}_E = \dot{H} + \frac{V}{g} \dot{V}, \quad (5)$$

式中: \dot{H}_E 表征飞机潜在的爬升率, \dot{H} 表示飞机的几何上升率, \dot{V} 表示飞机速度变化率。根据公式(3)、(4)和(5)可以得到:

$$\dot{H}_E = \left[\frac{T \cos \alpha - D}{mg} - \left(\frac{\dot{W}_x}{g} \cos \gamma_a + \frac{\dot{W}_h}{g} \sin \gamma_a - \frac{W_h}{V} \right) \right] V, \quad (6)$$

令:

$$F = \frac{\dot{W}_x}{g} \cos \gamma_a + \frac{\dot{W}_h}{g} \sin \gamma_a - \frac{W_h}{V}, \quad (7)$$

其中: \dot{W}_x 为水平风速加速度, \dot{W}_h 为垂直风速加速度,在飞机起降阶段 γ_a 很小, $\sin \gamma_a$ 可以近似为 0,得到 F 因子的表达式为:

$$F = \frac{\dot{W}_x}{g} - \frac{W_h}{V} = \frac{V_a}{g} \frac{dU_x}{dR} - \frac{W_h}{V_a}. \quad (8)$$

在下滑道扫描算法中,上式 g 是重力加速度; R 为两个径向风速点之间的水平距离, U_x 为风速廓线上这段距离间的径向风速差, $\frac{dU_x}{dR}$ 表示沿下滑道方向的风速变化梯度; V_a 为飞机进近时的速度。通过分析表达式,可以看出 F 因子是一个无量纲的标量。F 因子是从变化风场对飞机飞行性能影响的角度出发,通过飞机的能量状态变化情况来反映风场变化,间接达到检测低空风切变的目的,因此使用 F 因子检测低空风切变与风场本身是没有关系的,并不局限于风切变类型。

F 因子表达式主要由两部分组成,第一部分是径向风速梯度,第二部分则是垂直方向的风速分量。当 $F < 0$ 时,飞机飞行性能增加,表明飞机可能遭遇逆风或上升气流;当 $F > 0$ 时,飞机飞行性能减小,表明飞机可能遭遇顺风或下沉气流。公式(8)的第二部分存在垂直方向的风速分量,由

于此分量方向与激光雷达的探测波束垂直,所以无法直接测量。FAA 和 NASA 长期以来通过对大量风切变模型及实际飞行数据进行分析^[21],证明 \dot{W}_x 和 W_h 对 F 因子的数值大小影响程度是相近的,因此考虑垂直风速分量是十分有必要的。

垂直风速分量不能直接测量,本文对这个量进行工程上的近似。假设一个轴对称的微下击暴流理论模型,利用质量连续性方程,在能量无损耗条件下^[22-23],可以认为:

$$W_h = \lambda h \frac{\partial U_x}{\partial R}, \quad (9)$$

其中: λ 是比例常数, $\lambda = -2$ 表示遭遇使飞行性能下降的风切变, $\lambda = -1$ 表示遭遇使飞行性能上升的风切变, h 表示飞机距离地面的高度。将式(9)代入式(8)可以得到修正 F 因子的表达式为:

$$F_m = \frac{V_a}{g} \left(1 - \frac{\lambda g h}{V_a^2} \right) \frac{dU_x}{dR}, \quad (10)$$

F_m 表示修正后的 F 因子。从表达式中可以看出,求解 F_m 的关键在于求得下滑道上的径向风速梯度,其表征了风速随距离的变化率,可以采用最小二乘拟合思想^[23]。在一个二维平面中,采用分段拟合的思想进行直线拟合,得到的直线斜率即为该直线的梯度,最小二乘拟合示意图如图 3 所示。最小二乘方法所选择的回归模型是使所有观察值的残差平方和最小,样本回归模型为:

$$V^* = aL + b, \quad (11)$$

式中: V^* 为回归模型得到的理论风速值, L 为对应点的水平距离, a 表示拟合直线斜率,即径向风速梯度, b 是直线截距。则由回归模型得到的理论值和实测值之间的误差为:

$$\begin{cases} e_i = V_i - V_i^* = V_i - aL_i - b \\ E = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (V_i - aL_i - b)^2 \end{cases}, \quad (12)$$

其中: V_i 表示参与最小二乘拟合的第 i 点沿下滑道方向的速度分量; L_i 表示第 i 点的水平距离; n 表示参与拟合最小二乘拟合的数据点个数。为满足误差平方和最小的要求,即让 E 分别对 a 、 b 求偏导,得到拟合直线表达式为:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n V_i L_i - \sum_{i=1}^n V_i \sum_{i=1}^n L_i}{n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2}. \quad (13)$$

得到径向风速梯度之后,可以知道 F_m 的正负性,再由 F_m 的正负判断飞机遭遇的是上升气流

还是下沉气流,由此得到 λ 的值,计算 F_m 的数值,最后根据经验阈值进行风切变检测。

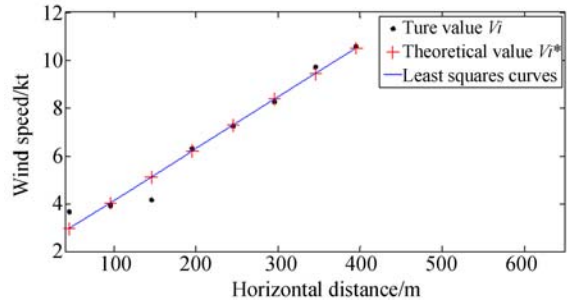


图 3 最小二乘直线拟合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of least squares straight line fitting

4 实验数据验证及分析

4.1 激光雷达数据实验验证

本文数据来源于香港国际机场的测风相干激光雷达,使用 2015 年 3 月 5 号 01:26:00 时刻探测的晴空风场数据进行实验验证。风场数据经过提取和挑选后得到的下滑道风速廓线如图 4 所示。横坐标原点在着陆点处,表示下滑道上各点在跑道上的投影点到飞机着陆点的水平距离,单位是 NM(海里,1 NM=1.852 km),纵坐标表示下滑道上各点的逆风风速,单位是 kt(节,1 kt=1.9 km/h)。国际上规定两点间风速差值超过 7.7 m/s(15 kt)判定发生了风切变,接着选用 400 m 和 800 m 两个尺度范围搜索下滑道上风速差值超过 15 kt 的切变段,用‘+’表示切变起始点位置,‘o’表示结束位置,搜索结果如图 5、6 所示。搜索结果表明,在 400 m 范围内发现一处风切变区域,距着陆点 3.4~3.6 NM;在 800 m 范围内则存在两处,分别离着陆点 1.4~1.8 NM 和 3.7~4.1 NM。

使用修正 F 因子算法对重构的风速廓线进行检测,结果如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。图中黑色虚线表示下滑道风速廓线,蓝色实线表示修正 F 因子曲线,红色标记处表示检测到切变段的起始位置,红色方框内表示检测到的风场切变区域。

接着使用斜坡算法^[10]对同一条下滑道风速廓线进行处理,斜坡长度分别选取 400 m 和 800 m,处理结果如图 8、9 所示,黑色虚线为下滑道风

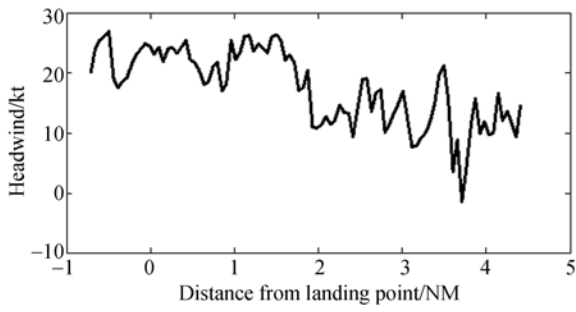


图 4 下滑道风速廓线图

Fig. 4 Headwind profiles of glide path

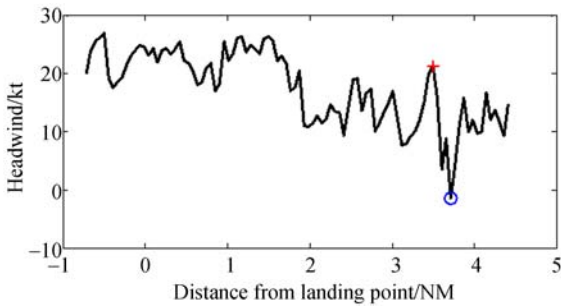


图 5 400 m 范围内风速变化情况图

Fig. 5 Within 400 meters of wind speed change

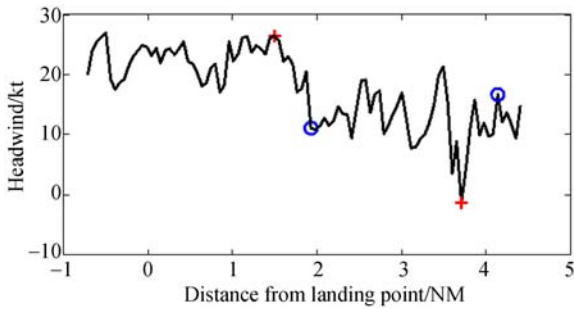


图 6 800 m 范围内风速变化情况图

Fig. 6 Within 800 meters of wind speed change

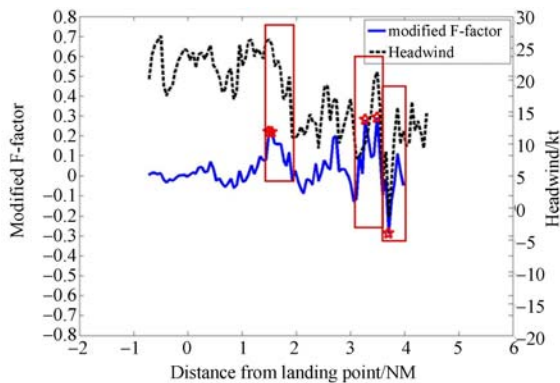


图 7 修正 F 因子算法检测风切变结果图

Fig. 7 Wind shear result based on modified F-factor

速廓线,蓝色实线表示斜坡算法检测结果,红色方框内为检测到风切变区域,用‘*’表示检测到风切变的起始位置。

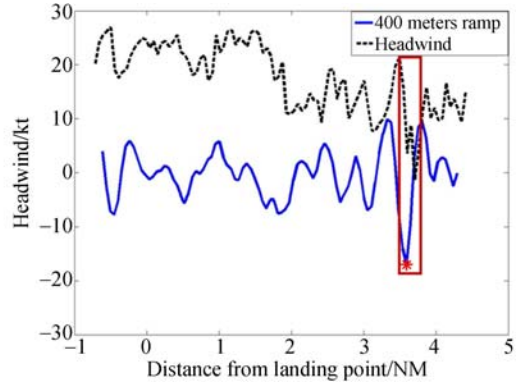


图 8 400 m 斜坡检测风切变结果图

Fig. 8 Wind shear result of 400 meters' ramp

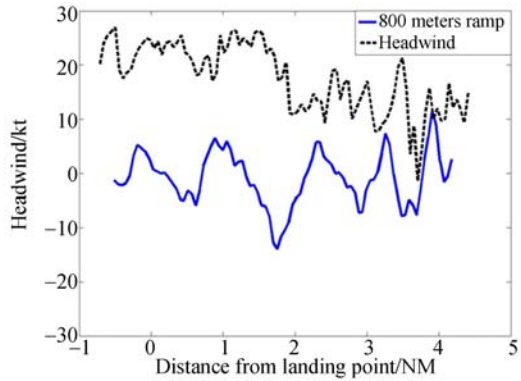


图 9 800 m 斜坡检测风切变结果图

Fig. 9 Wind shear result of 800 meters' ramp

4.2 实验结果对比分析

对于同一条下滑道风速廓线,由图 7 可以看出,修正 F 因子检测算法对三处最强切变处均能捕获到,而对照图 6,发现图 9 中使用斜坡算法会对 800 m 范围内的两处风切变产生漏报,说明修正 F 因子能更加全面的检测到切变长度在 400~800 m 的风切变;使用斜坡算法检测时,风切变检测范围仅在 3~4 NM,而修正 F 因子算法将检测范围扩大到 1~4 NM,有利于提高风切变预警率和降低漏报率;斜坡算法和修正 F 因子算法均能检测到发生在图 5 中 3.4~3.6 NM 处的 400 m 范围内的风切变,从风速廓线上读取此风切变的起始位置是 3.492 2 NM,经斜坡算法检测到这个风切变的起始位置是 3.484 4 NM,而使用修正 F 因子算法检测到此处风切变的起始位置是

3.492 2 NM,证明了修正F因子算法捕获到的风切变位置比斜坡算法更接近真实发生位置,增大了低空风切变预警的准确性。

斜坡算法是从风速差值的大小来预警风切变的有无,而修正F因子可以反映变化风场对飞机性能的影响程度。在图9中,以着陆飞机为例,下滑道风速廓线上在1.4~1.8 NM处,飞机接触到的风场风速从26 kt下降到11 kt,说明飞机遭遇了严重的顺风切变或下沉气流,实际数据计算得到此处的修正F因子数值为0.22;而在3.7~4.1 NM处,风速值从-1.4 kt上升到16.6 kt,风速的突然增加证明此处的飞机会遇到了逆风切变或上升气流,计算此处的修正F因子数值为-0.28。由此说明修正F因子除了通过它的经验阈值检测风切变的有无之外,还能由它的正负性判断飞机遭遇到顺风切变还是逆风切变,在实际应用中可以方便飞行员对飞行状态做出正确判断和调整。

综上所述,文中的检测算法具有以下优点:

(1)修正F因子可以更为全面且有效地检测到斜坡算法无法捕获到的小尺度风切变,有利于提高风切变预警率和准确性;

(2)扩大了小尺度风切变检测范围,可以一定程度上降低风切变漏报率;

参考文献:

- [1] 张杰. 中小尺度天气学[M]. 北京:气象出版社, 2006: 2-4.
ZHANG J. *Small and Medium Scale Synoptic* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 2-4. (in Chinese)
- [2] 蒋立辉, 赵丽艳, 熊兴隆. 基于自适应多尺度的梯度搜索风切变预警算法研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(31): 1-6.
JIANG L H, ZHAO L Y, XIONG X L. The gradient search alerting algorithm of low-level wind shear based on adaptive scale[J]. *Science Technology and*

(3)修正F因子的正负性可以反映飞机遭遇到顺风切变还是逆风切变,方便飞行员及时做出正确调整,对运行和维护民航安全更具深远意义。

5 结 论

本文提出了一种测风激光雷达修正F因子的风切变检测算法,满足了民航飞行安全中对无法有效检测小尺度风切变的需求。传统F因子表征变化风场对飞机飞行性能的影响程度,主要由径向风速梯度和垂直风速分量组成,由于实际测量中垂直风速分量与雷达波束指向垂直,因此通过雷达数据只能得到径向风速梯度。本文利用理论模型建立了垂直风速分量与径向风速梯度的函数关系,对传统F因子的表达式进行了修正。使用香港国际机场提供的真实测风激光雷达探测的风场数据对该检测算法和已有的斜坡算法进行了对比分析,结果表明,当风切变范围在400~800 m时,修正F因子检测算法可以比较全面地捕获到小尺度风切变,并且将风切变检测范围扩大了2 NM,有利于降低风切变检测的漏报率和提高风切变预警率,同时通过实测激光雷达数据也验证了利用地基雷达数据来检测机载指标变化的可行性和有效性。

Engineering, 2015, 15(31): 1-6. (in Chinese)

- [3] 徐群玉, 宁焕生, 陈唯实, 等. 气象雷达在民航安全中的应用研究[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2147-2151.
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)
- [4] 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.
GUO Y L, WAN J W, LU M, *et al.*. Three dimensional orientation estimation for ladar target[J].

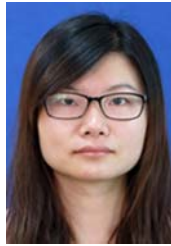
- Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 843-850. (in Chinese)
- [5] 张艳艳, 巩轲, 何淑芳, 等. 激光多普勒测速技术进展[J]. *激光与红外*, 2010, 40(11): 1157-1162. ZHANG Y Y, GONG K, HE SH F, *et al.*. Progress in laser Doppler velocity measurement techniques[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1157-1162. (in Chinese)
- [6] 李一哲, 薛斌, 赵意意. 合成孔径激光雷达大视场技术综述[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 300-308. LI Y ZH, XUE B, ZHAO Y Y. Development of wide field of view technology of synthetic aperture lidar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 300-308. (in Chinese)
- [7] ABARI C F, PEDERSEN A T, MANN J. An all-fiber image-reject homodyne coherent Doppler wind lidar[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25880-25894.
- [8] 贾晓东. 1.55 μm 相干测风激光雷达样机的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015. JIA X D. *Development of 1.55 μm coherent lidar for wind sensing*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [9] CHAN P W, HON K K. Observation and numerical simulation of terrain-induced Windshear at the Hong Kong international airport in a planetary boundary layer without temperature inversions[J]. *Advances in Meteorology*, 2016, 2016: 1454513.
- [10] 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[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0106001. JIANG L H, YAN Y, XIONG X L, *et al.*. Doppler lidar alerting algorithm of low-level wind shear based on ramps detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106001. (in Chinese)
- [11] PROCTOR F H, HINTON D A, BOWLES R L. *A Windshear Hazard Index*[M]. Washington D. C: NASA Langley Technical Report Server, 2000.
- [12] BYRD G P, PROCTOR F H, BOWLES R L. Evaluation of a technique to quantify microburst Windshear hazard potential to aircraft[C]. *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, 1990: 689-694.
- [13] 金长江. 美国低空风切变危险性评估的研究概况[J]. *飞行力学*, 1993, 11(1): 1-7. JIN CH J. Research status of Harzard estimation criterion of low-level Windshear in America[J]. *Flight Dynamics*, 1993, 11(1): 1-7. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] CHAN P W. Application of LIDAR-based F-factor in Windshear alerting [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, 21(2): 193-204.
- [16] 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.
- [17] SHUN C M, CHAN P W. Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 25(5): 637-655.
- [18] 胡琦, 李元祥, 宋金泽, 等. 基于多普勒激光雷达的风场预测[J]. *激光与红外*. 2012, 42(3): 268-273. HU Q, LI Y X, SONG J Z, *et al.*. Application of Doppler lidar data in wind forecasting[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(3): 268-273. (in Chinese)
- [19] BOWLES R L. Windshear detection and avoidance: airborne systems survey[C]. *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, 1990: 708-736.
- [20] FROST W. Flight in low-level wind shear[R]. NASA-CR-3678. Washington: NASA, 1983.
- [21] 金长江, 张洪, 朱仁标, 等. 低空风切变危险尺度研究[J]. *航空学报*, 1992, 13(10): 481-486. JIN CH J, ZHANG H, ZHU R B, *et al.*. A study on low level Windshear risk estimation crite-

- rion[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1992, 13(10): 481-486. (in Chinese)
- [22] 韩雁飞. 强杂波背景下的低空风切变检测技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2013.
HAN Y F. *Detection of low-altitude wind shear in strong clutter*[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2013. (in Chinese)
- [23] VICROY D D. Microburst vertical wind estimation from horizontal wind measurements [R]. N95-10567. Washington: NASA, 1995: 143-176.

作者简介:



陈 星(1984—),男,河北辛集人,硕士,研究实习员,2008年于天津商业大学获得学士学位,2014年于中国民航大学获得硕士学位,主要从事信号与信息处理、激光雷达技术及空间风场探测风切变识别等研究工作。E-mail: xchencauc@163.com



李 贞(1992—),女,湖北荆州人,硕士研究生,2011年于中国民航大学获得学士学位,主要从事测风激光雷达风场探测、低空风切变预警等研究工作, E-mail: 135182299@qq.com