

基于速度结构函数的多普勒激光雷达低空湍流预警算法

熊兴隆^{1,2}, 韩永安¹, 蒋立辉^{1,2}, 陈柏纬³, 陈星²

(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: 为提高激光雷达对小尺度低空湍流的预警率, 提出了一种将下滑道扫描与横向速度结构函数相结合的预警算法。首先, 把下滑道扫描方式下得到的扫描扇区分成多个重叠的子扇区, 采用空间波动法计算每个子扇区的横向结构函数。其次, 将结构函数与 Von Karman 模型预测的结构函数拟合得到涡流耗散率, 并以国际民航组织规定的湍流阈值来判断湍流强度。使用香港天文台安装在香港国际机场的激光雷达采集数据进行了实验验证, 结果表明新方法能够检测出纵向速度结构函数未能检测出的小尺度湍流。该方法是有用的, 对于提高湍流的预警率有重要意义。

关键词: 速度结构函数; 低空湍流; 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/IRLA201746.1030005

Doppler lidar alerting algorithm of low-level turbulence based on velocity structure function

Xiong Xinglong^{1,2}, Han Yong'an¹, Jiang Lihui^{1,2}, Chen Bowei³, Chen Xing²

(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, Hong Kong 999077, China)

Abstract: To raise the alarm rate of small scale and low-level turbulence detected by lidar, an alerting algorithm based on the combination of glide-path scanning and transverse velocity structure function was presented in this paper. Firstly, the scanning sector of the glide-path was divided into several overlapping subsectors, and the transverse structure function of each subsector was calculated by using the spatial fluctuation method. Secondly, the structure function was fitted with that predicted by the theoretical Von Karman model to give eddy dissipation rate, and the results on provisions of the International Civil Aviation Organization's turbulence threshold was compared to come to the conclusion. The performance of the proposed method was verified through the lidar collecting data of Hong Kong International Airport installed by Hong Kong Observatory. The results show that the proposed algorithm detects the small scale turbulence which longitudinal velocity structure function fails to detect. The new proposed method is effective, it is significant to raise the alarm rate.

Key words: velocity structure function; low-level turbulence; lidar; glide-path scanning

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1433202); 国家自然科学基金(U1533113); 中央高校基本科研基金(3122016D007); 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122016B001)

作者简介: 熊兴隆(1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事信号与信息处理、激光雷达气象探测方面的研究。

Email: xx_long@126.com

0 引言

在航空气象中,低空湍流是指 500 m 高度以下大气快速不规则的流动,表现为速度场的时间不连续性和空间不均匀性,使飞机产生颠簸,严重时会让飞机短暂失控,对升降航班安全构成威胁,因此有必要对低空湍流进行有效预警^[1]。

目前,机场的多普勒天气雷达只能用来探测云雨天气条件下的湍流,由于晴空下的湍流并无可见的天气现象且尺度较小,天气雷达无法探测。多普勒激光雷达相对于天气雷达具有空间分辨率高、时间分辨率高、测量精度高、适用于晴空观测等优势^[2],这非常适合探测大气湍流统计特性。在激光雷达预警算法研究方面,2009 年陈柏纬^[3]利用激光雷达的谱宽数据来计算涡流耗散率,该方法还需要大量的实验来评估。2011 年陈柏纬^[4]利用 F 因子预警低空湍流,由于国际上没有明确规定 F 因子的阈值,需要大量的实验来建立湍流强度与 F 因子阈值的经验关系。观测香港国际机场使用的是基于纵向结构函数的低空湍流预警算法,并开发了针对飞机下滑道的下滑道扫描策略,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,很大程度上提高了湍流预警率^[5-6]。由于激光雷达径向分辨率的限制,这种方法不能有效地检测所有尺度湍流,对较小尺度湍流会造成漏报。

文中在其预警算法的基础上,考虑湍流的横向速度结构函数模式,提出了一种将下滑道扫描与横向速度结构函数相结合的预警算法。首先,将下滑道扫描方式得到的径向风数据进行质量控制处理后分成多个重叠的子扇区,进而采用空间波动法计算每个子扇区的结构函数,其次将结构函数与 Von Karman 模型预测的结构函数拟合得到湍流参数,计算涡流耗散率并以国际上规定的阈值发出湍流强度预警。

1 相干多普勒激光雷达测风原理

相干多普勒激光雷达利用光外差探测技术获得激光多普勒频移信息从而求取径向风速。基本测速思路是激光雷达系统向大气发射激光脉冲,并接收

大气中气溶胶粒子和大气分子的后向散射回波信号,测量回波信号与发射激光间的差频信号来获取由运动粒子引起的激光多普勒频移信息^[7]。多普勒频移与径向风速之间的关系如公式(1)所示^[8]。

$$V = \frac{\lambda}{2} \Delta\nu \quad (1)$$

式中: V 为径向风速; $\Delta\nu$ 为多普勒频移; λ 为激光波长。

文中的激光雷达使用的是波长为 2 μm 的红外激光束,发射激光脉冲能量为 2 mJ,重复频率为 500 Hz,脉宽为 400 ns,径向数据更新频率为 10 Hz,探测距离为 0.4~1.0 km,径向分辨率 105 m^[9]。

2 基于速度结构函数的预警算法

2.1 下滑道扫描策略

文中激光雷达的扫描方式为下滑道扫描^[10],利用同时改变仰角和方位角的新方法来扫描机场下滑道,集中探测飞机起飞和着陆区域内的风场情况。飞机起飞与着陆时下滑道与跑道的夹角不同,分别是 6°和 3°。飞机着陆进场时下滑道扫描示意图如图 1 所示。

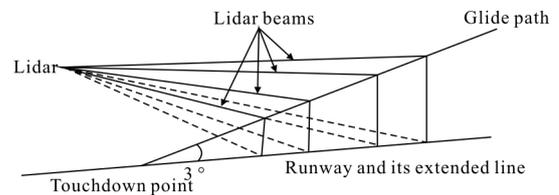


图 1 下滑道扫描示意图

Fig.1 Schematic diagram of a glide-path scanning

2.2 质量控制处理

激光雷达得到的径向风数据可能存在异值点,需要用质量控制程序处理这些异值点,包括确定是否在一定距离范围内连续存在数个可靠数据点,并将每一个风数据点与临近数据点进行比较,若差值超过预设的阈值(此阈值是由激光雷达相邻距离门的频率分布所决定的),则用中值滤波器的值来代替此值^[10]。

2.3 计算湍流脉动速度

研究湍流时,通常采用湍流脉动量来研究,即激光雷达测量的瞬时径向风速与其平均值之差,它代

表示了湍流的涨落。

文中采用空间平均的方法对风速进行平均,为了更准确地得到平均风速,把激光雷达的整个空间扫描区域划分成多个重叠的子扇区,如图 2 所示,每个子扇区的范围是由 m 个距离门和 n 条径向线组成的,子扇区间重叠 $m/2$ 个距离门和 $n/2$ 条径向线。 m 和 n 的取值可以根据不同情况进行调节。

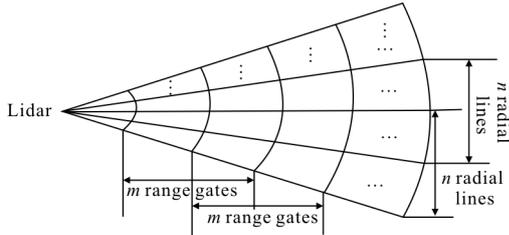


图 2 扫描扇区划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of scanning sector division

由于下滑道周围的径向风速点对飞机的起飞与着落最有影响,因此需要将下滑道周围的子扇区筛选出来。下滑道上点的坐标为 (R, Az) , 在子扇区中筛选出距离该点最近的四个子扇区, 分别位于该点的左下方、右下方、左上方和右上方。已知各个子扇区中心点的坐标 (r, θ) , $Az \geq \theta$ 时, θ 的最大值为 $\max \theta$, $R \geq r$ 时, r 的最大值为 $\max r$, 当 $(r, \theta) = (\max r, \max \theta)$ 时, 该子扇区为距离 (R, Az) 最近的左下方的扇区; $Az \leq \theta$ 时, θ 的最小值为 $\min \theta$, $R \leq r$ 时, r 的最大值为 $\max r$, 当 $(r, \theta) = (\max r, \min \theta)$ 时, 该子扇区为距离 (R, Az) 最近的右下方的扇区; $Az \geq \theta$ 时, θ 的最大值为 $\max \theta$, $R \leq r$ 时, r 的最小值为 $\min r$, 当 $(r, \theta) = (\min r, \max \theta)$ 时, 该子扇区为距离 (R, Az) 最近的左上方的扇区; $Az \leq \theta$ 时, θ 的最小值为 $\min \theta$, $R \leq r$ 时, r 的最大值为 $\min r$, 当 $(r, \theta) = (\min r, \min \theta)$ 时, 该子扇区为距离 (R, Az) 最近的右上方的扇区。

筛选完下滑道附近的子扇区后,把每个子扇区内所有点的径向风速拟合到一个空间平面,对其进行空间平均,设平面方程的表达式如公式(2)所示。

$$\bar{v}(R, \theta) = a_0 R + a_1 \theta + a_2 \quad (2)$$

式中: $\bar{v}(R, \theta)$ 为平均速度; R 为距离; θ 为方位角度。

每个子扇区内,有一系列的 n 个激光雷达测量点,如公式(3)所示。

$$(R_i, \theta_i, v_i(R_i, \theta_i)), i=0, 1, \dots, n-1 \quad (3)$$

式中: R_i 为第 i 个点与激光雷达之间的距离; θ_i 为第 i 个点的方位角度; v_i 是第 i 个点的径向风速。

用公式(3)这 n 个激光雷达测量点来拟合公式(2)的平面方程,即要使公式(4)的值最小。

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} (a_0 R_i + a_1 \theta_i + a_2 - v_i)^2 \quad (4)$$

根据最小二乘法,要使得 S 最小,应满足:

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, k=0, 1, 2 \quad (5)$$

即:

$$\begin{cases} \sum 2(a_0 R_i + a_1 \theta_i + a_2 - v_i) R_i = 0 \\ \sum 2(a_0 R_i + a_1 \theta_i + a_2 - v_i) \theta_i = 0 \\ \sum 2(a_0 R_i + a_1 \theta_i + a_2 - v_i) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

联立公式(6)中的方程组,即可求得平面方程中的三个未知参数 a_0, a_1, a_2 :

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum R_i^2 & \sum R_i \theta_i & \sum R_i \\ \sum R_i \theta_i & \sum \theta_i^2 & \sum \theta_i \\ \sum R_i & \sum \theta_i & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum R_i v_i \\ \sum \theta_i v_i \\ \sum v_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

那么在子扇区内的空间 (R, θ) 上每个雷达测量点都有一个脉动速度 $v'(r, \theta)$, 如公式(8)所示。

$$v'(R, \theta) = v(R, \theta) - \bar{v}(R, \theta) \quad (8)$$

式中: $v(R, \theta)$ 为激光雷达测量的瞬时径向速度; $\bar{v}(R, \theta)$ 为平均速度。

2.4 速度结构函数检测湍流

现有湍流统计理论的成果绝大部分都是建立在均匀各向同性的假设之上得到的。湍流的局地各向同性可以根据量纲分析,用一些统计函数表示,例如 Kolmogorov 引进的湍流结构函数,即湍流脉动速度增量间的相关函数^[1]。

纵向结构函数计算的是每个子扇区纵向方向上不同滞后距离门的脉动速度差,如公式(9)所示。

$$D_L(k\Delta s) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1-k} [v'(R_1 + j\Delta s, \theta + l\Delta \theta) - v'(R_2 + j\Delta s, \theta + l\Delta \theta)]^2 - E(R_1, R_2) \quad (9)$$

式中： $k\Delta s=R_1-R_2$ ； N 为子扇区内有效的速度波动总次数，连续七个下滑道扫描可积累足够的径向风相差来计算结构函数； $E(R_1, R_2)$ 为测量误差的无偏估计，由激光雷达信号的随机波动引起的，使用脉动速度差的协方差方法计算^[12]。协方差公式为：

$$C(R_1, R_2, i\Delta\theta) =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1-k} [v'(R_1+j\Delta s, \theta+l\Delta\theta) - v'(R_2+j\Delta s, \theta+l\Delta\theta)] \times [v'(R_1+j\Delta s, \theta+(l+i)\Delta\theta) - v'(R_2+j\Delta s, \theta+(l+i)\Delta\theta)] \quad (10)$$

用不同方位角的协方差值来计算误差项 $E(R_1, R_2)$ ，如公式(11)所示。

$$E(R_1, R_2) = C(R_1, R_2, 0) - 2C(R_1, R_2, \Delta\theta) + C(R_1, R_2, 2\Delta\theta) \quad (11)$$

由于激光雷达距离门的限制，纵向结构函数计算的脉动速度差最小距离为距离门长度，对于尺度小于距离门的湍流容易造成漏报。假设子扇区内速度场的时间演化较小，即泰勒提出的“湍流冻结”理论是有效的^[13]，可以用横向结构函数来描述湍流风场，它计算的是每个子扇区横向方向上不同滞后方位角的脉动速度差，如公式(12)所示。由于径向线之间的横向尺寸 $R\Delta\theta$ 远小于距离门，所以横向结构函数计算脉动速度差的最小距离远小于距离门长度。

$$D_{Az}(k\Delta\theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{n-1-k} [v'(R+j\Delta s, \theta+l\Delta\theta) - v'(R+j\Delta s, \theta+(l+k)\Delta\theta)]^2 - E(R) \quad (12)$$

式中：误差项 $E(R)$ 也是使用脉动速度差的协方差方法计算。协方差公式为：

$$C(R, i\Delta\theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{n-1-k} v'(R+j\Delta s, \theta+l\Delta\theta) \times v'(R+j\Delta s, \theta+(l+i)\Delta\theta) \quad (13)$$

用不同方位角的协方差值来计算误差项 $E(R)$ ，如公式(14)所示。

$$E(R) = 2(C(R, 0) - 2C(R, \Delta\theta) + C(R, 2\Delta\theta)) \quad (14)$$

结构函数的一个简单模型^[14]如公式(15)所示。

$$D_v(s) = 2\sigma^2 \Lambda(s/L_0) \quad (15)$$

式中： σ^2 和 L_0 为两个湍流参数，分别代表径向速度方差和湍流尺度； $\Lambda(x)$ 为通用函数。

根据 Von Karman 模型，通用函数 $\Lambda(x)$ 为：

$$\Lambda(x) = 1 - (0.592\ 548\ 5)x^{1/3} K_{1/3}(x) \quad (16)$$

式中： $K_{1/3}(x)$ 为修正的 1/3 阶贝塞尔函数。

在局地均匀各向同性湍流的假设下，根据 Kolmogorov 湍流理论，结构函数可由涡流耗散率完全决定^[11]，如公式(17)所示。

$$D_v(s) = 2\varepsilon^{2/3} s^{2/3} \quad (17)$$

式中： ε 为涡流耗散率。

将公式(15)和公式(17)联立，可求得涡流耗散率，如公式(18)所示。

$$\varepsilon = (0.933\ 668) \frac{\sigma^3}{L_0} \quad (18)$$

将计算得到的横向结构函数与理论上的 Von Karman 模型预测的横向结构函数拟合计算涡流耗散率。

对于均匀各向同性的湍流，Von Karman 模型^[15]预测的横向结构函数如公式(19)所示。

$$D(s, \sigma, L_0) = 2\sigma^2 G(s/\Delta p, \mu, \chi) \quad (19)$$

式中： $s=R\Delta\theta$ 代表弧长；模型参数 $\mu=(2\ln 2)^{1/2}\Delta p/\Delta r$ ， $\chi=\Delta p/L_0$ ； Δr 为激光雷达脉冲幅度； $G(s/\Delta p, \mu, \chi)$ 如公式(20)所示。

$G(m, \mu, \chi) =$

$$2 \int_0^\infty F(x, \mu) \left[\frac{\Lambda(\chi\sqrt{m^2+x^2}) - \Lambda(\chi x) + \Lambda_D(\chi\sqrt{m^2+x^2})m^2/\Lambda(m^2+x^2)}{m^2} \right] dx \quad (20)$$

式中： $F(x, \mu)$ 如公式(21)所示。

$$F(x, \mu) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\mu} \{ \exp[-\mu^2(x+1)^2] + \exp[-\mu^2(x-1)^2] - 2\exp[-\mu^2x^2] \} + \frac{1}{2} \{ (x+1)\text{erf}[\mu(x+1)] + (x-1)\text{erf}[\mu(x-1)] - 2x\text{erf}[\mu(x)] \} \quad (21)$$

式中： $\text{erf}(x)$ 为标准误差函数。

将公式(12)计算的横向结构函数和公式(19) Von Karman 模型预测的横向结构函数进行拟合，如公式(22)所示，其结果是一卡方分布，在 $D(k\Delta s, \sigma, L_0)$ 表达式里含有湍流参数 σ^2 和 L_0 ，其他参数是已知的。公式(22)是测量值与理论值之差，理论结果为零，但由于测量误差的存在，其结果不可能为零，基于这个思路，把公式(22)最小时的 σ^2 和 L_0 作为探测区涡流耗散率的计算，进而判断湍流强度。

$$\chi^2 = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} \frac{[D_{Az}(k\Delta s) - D(k\Delta s, \sigma, L_0)]^2}{D^2(k\Delta s, \sigma, L_0)} \quad (22)$$

式中： Δs 为相邻速度点之间的距离间隔， N_s 为用于拟合的滞后数量，可以根据不同情况而调节，从而适用于不同强度的湍流。

上述速度结构函数方法求出了下滑道附近各个子扇区的涡流耗散率值，然后采用二维线性插值的方法计算下滑道上点的涡流耗散率值，从而构造飞机在下滑道上遇到的湍流强度廓线。

根据国际民航组织的相关标准，湍流强度以涡流耗散率 (Eddy Dissipation Rate, EDR) 的立方根 ($EDR^{1/3}$) 分级，当 $EDR^{1/3}$ 在 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 之间定义为中度湍流，当 $EDR^{1/3}$ 大于等于 $0.5 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 时定义为强烈湍流^[1]。在发出预警或飞机报告方面，中度或强烈湍流均属于显著的湍流。

3 方法验证及对比分析

此节使用香港国际机场不同时刻的相干多普勒激光雷达实际观测数据对该方法进行了实验验证。

下滑道扫描平面图如图 3 所示，图中“+”代表激光雷达的位置，位于两条跑道之间，图中灰色阴影区域是下滑道扫描的区域。激光雷达的方位扫描速率是 $1.4 (^\circ)/\text{s}$ ，每 0.1 s 出一条径向线，方位间隔为 0.14° ，每完成一个扫描周期的时间是 1 min 左右。把扫描区域分成多个重叠的子扇区，其中每个子扇区包含 10 个距离门和 15 条径向线。

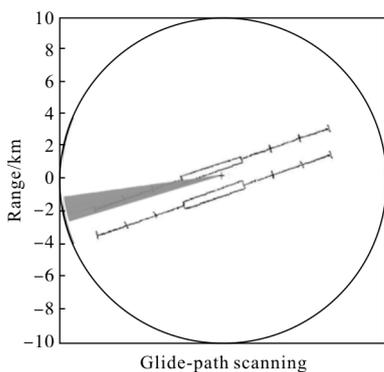


图 3 下滑道扫描平面图

Fig.3 Plan view of the glide-path scanning

对径向风数据使用纵向结构函数方法计算 EDR，下滑道上的湍流强度廓线如图 4 所示。图 4 表明距离跑道着陆点 $0.82 \sim 1.25 \text{ nm}$ 产生中度湍流预警。

对同一组径向风数据再使用横向结构函数方法

计算 EDR，下滑道上的湍流强度廓线如图 5 所示。图 5 表明距离跑道着陆点 $0.82 \sim 1.3 \text{ nm}$ 产生中度湍流预警。

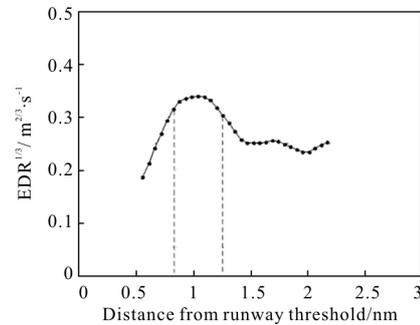


图 4 纵向结构函数方法计算湍流强度廓线示意图

Fig.4 Schematic diagram of longitudinal structure function method in turbulence intensity profile

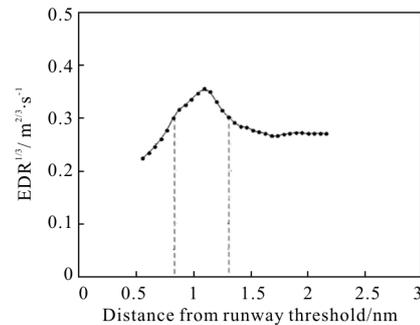


图 5 横向结构函数方法计算湍流强度廓线示意图

Fig.5 Schematic diagram of transverse structure function method in turbulence intensity profile

以上实验可以看出两种方法的计算结果比较一致，使用横向结构函数预警湍流比使用纵向结构函数得到了更为准确的湍流预警范围，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 $0.82 \sim 1.25 \text{ nm}$ 提高到了 $0.82 \sim 1.3 \text{ nm}$ ，同时验证了算法的有效性。

横向结构函数方法对检测小尺度的湍流更为有利，当纵向结构函数方法无法检测到湍流时，用横向结构函数检测到了较小尺度的湍流。采用两组不同时间的径向风数据，使用纵向结构函数与横向结构函数计算 EDR。检测图如图 6~9 所示。图 6 和图 8 表明纵向结构函数没有检测到湍流。图 7 表明在距离跑道着陆点 $1.45 \sim 1.8 \text{ nm}$ 产生了中度湍流预警。图 9 表明在距离跑道着陆点 $1.2 \sim 1.5 \text{ nm}$ 产生了中度湍流预警。

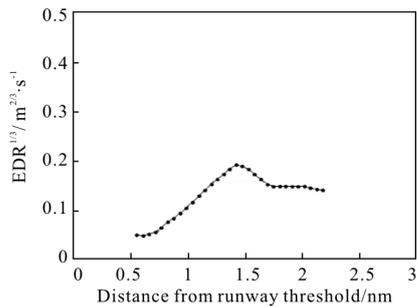


图 6 纵向结构函数方法计算湍流强度廓线示意图

Fig.6 Schematic diagram of longitudinal structure function method in turbulence intensity profile

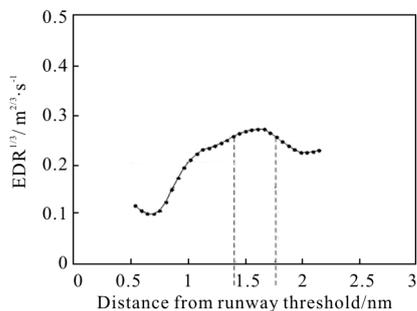


图 7 横向结构函数方法计算湍流强度廓线示意图

Fig.7 Schematic diagram of transverse structure function method in turbulence intensity profile

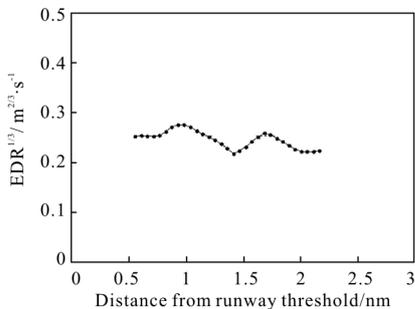


图 8 纵向结构函数方法计算湍流强度廓线示意图

Fig.8 Schematic diagram of longitudinal structure function method in turbulence intensity profile

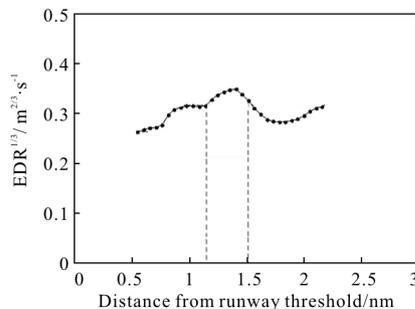


图 9 横向结构函数方法计算湍流强度廓线示意图

Fig.9 Schematic diagram of transverse structure function method in turbulence intensity profile

通过纵向结构函数检测与横向结构函数检测进行对比实验可知,当纵向结构函数可以检测到湍流时,检测的范围为 0.82~1.25 nm,而横向结构函数检测范围为 0.82~1.3 nm,增加了 0.05 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。当纵向结构函数未能检测到湍流时,横向结构函数捕捉到了较小尺度的湍流,检测范围分别为 1.45~1.8 nm 和 1.2~1.5 nm。验证了算法的有效性。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。

文中预警算法具有以下优点:

(1) 当仅应用纵向结构函数进行检测时,检测范围可能发生漏报,加入横向结构函数,可提高检测范围精度。

(2) 横向结构函数能够检测到纵向结构函数未能检测到的较小尺度湍流,对提高预警率是有一定意义的。

4 结 论

文中提出了将下滑道扫描与横向速度结构函数方法相结合的一种低空湍流预警算法,使用香港国际机场相干激光雷达实际数据验证了算法的有效性,同时也说明了考虑横向速度结构函数对提高湍流预警率有重要意义,针对国内机场不同特点更具实际价值。该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] International Civil Aviation Organization (ICAO). Meteorological service for International Air Navigation: Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation [M]. 16th ed. Montreal, Canada: ICAO, 2007: 187.
- [2] 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.
- [3] Wong C C, Chan P W, Akaeda K. Calculation of turbulence intensity based on spectrum width data of a Doppler LIDAR[C]// Fourth Symposium on Lidar Atmospheric Applications, 2009.

- [4] 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.
- [5] Chan P W, Li C M. Comparison of turbulence intensity computed from LIDAR and aircraft data [C]//24th International Laser Radar Conference, 2008.
- [6] Chan P W, Lee Y F. Performance of LIDAR- and radar-based turbulence intensity measurement in comparison with anemometer-based turbulence intensity estimation based on aircraft data for a typical case of terrain-induced turbulence in association with a typhoon [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2013, 14(7): 469-481.
- [7] Han Yan, Sun Dongsong, Weng Ningquan, et al. Development of 60 km mobile Rayleigh wind lidar [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.
- [8] Du Lifang, Yang Guotao, Cheng Xuewu, et al. Design and realization of frequency locking system and laser velocity measuring system based on Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2562-2568. (in Chinese)
杜丽芳, 杨国韬, 程学武, 等. 基于多普勒测风激光雷达的锁频系统与激光测速系统的设计与实现 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2562-2568.
- [9] Jiang Lihui, Yan Yan, Xiong Xinglong, 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)
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.
- [10] 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.
- [11] Zhang Shijie, Li Junshan, Yang Yawei, et al. Simulation of aero-optic effects induced by fluctuation flow-field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2576-2581. (in Chinese)
张士杰, 李俊山, 杨亚威, 等. 脉动流场光学传输效应仿真 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2576-2581.
- [12] Frehlich Rod. Estimation of velocity error for Doppler lidar measurements [J]. *Atmos Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(10): 1628-1639.
- [13] Hill R J. Corrections to Taylor's frozen turbulence approximation[J]. *Atmospheric Research*, 1996, 40(s2-4): 153-175.
- [14] Frehlich Rod, Comman Larry. Estimating spatial velocity statistics with coherent Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19: 355-366.
- [15] Davies F, Collier C G. Doppler lidar measurements of turbulent structure function over an urban area[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(5): 753-761.