

基于激光雷达脉冲特性的湍流风速估计方法

庄子波¹, 刘晓宇², 陈 星³

- (1. 中国民航大学 飞行技术学院, 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. 天津市空管运行规划与安全技术重点实验室, 天津 300300)

摘 要: 提出了一种基于激光脉冲距离权重函数的湍流风场速度估计的方法, 可以解决多普勒信息探测晴空湍流风场中精细化的风速测量问题。算法以划分的距离门为单位对速度值进行空间平均, 将各距离单元速度与激光脉冲距离权重函数进行卷积运算得到风速的局部估计值。并考虑高斯激光脉冲在湍流风场中的有效空间展宽传输特性, 根据直接选取距离门中心位置的速度估计方法和快速的线性平均近似方法的处理过程, 引入激光脉冲的传输特性来表达湍流径向风速的统计平均值, 以实现湍流风速的测量以及激光雷达在探测湍流上的应用。实验结果表明, 在有明显湍流条件的风场环境中, 脉冲距离权重方法比线性平均方法在保留真实风场属性的前提下具有相对更小的速度标准差, 显示出较好的风速修正效果, 提高了激光雷达对湍流风场的测速性能。

关键词: 脉冲激光雷达; 速度空间平均; 湍流风场; 速度估计

中图分类号: P412.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1106001

Estimation method of turbulent wind speed based on lidar pulse characteristics

Zhuang Zibo¹, Liu Xiaoyu², Chen Xing³

- (1. College of Flight Technology, 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. Tianjin Key Laboratory of Operation Programming & Safety Technology of Air Traffic Management, Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on the distance weight function of laser pulse, the velocity estimation method of turbulent wind field was studied, which can solve the problem of fining wind speed measurement with Doppler information to detection clear air turbulence. The spatial averaging of the velocity values was taken as a unit of the distance gate. The localized estimations of the wind speed were obtained by convolving the distance unit velocity and the laser pulse distance weight function. Considering the transmission characteristics of the Gaussian laser pulse in the turbulent wind field, which included the effective spatial broadening of the laser pulse to realize the measurement of the turbulence velocity and the application of the lidar in the detection of turbulence. According to the direct speed estimation method and the fast linear average approximation method, the transmission characteristic of the laser pulse was

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1433202)

作者简介: 庄子波(1980-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事航空气象方面的研究。Email: zbzhuang@cauc.edu.cn

introduced to express the statistical mean value of the radial wind speed of the turbulence. The results show that in the wind field with obvious turbulence conditions, while the high precision pulse distance weighting method has a relatively small velocity standard deviation under the premise of preserving the real wind field attribute. It shows good performance in wind speed correction, improves the measuring performance of lidar on turbulent wind field.

Key words: pulse lidar; spatial average of velocity; turbulence wind field; speed estimation

0 引言

随着激光测风雷达在大气遥感领域应用优势的日益凸显,使威胁民航飞行安全^[1]的晴空湍流和风切变等风场精细特征的探测成为可能。低空大气风场的特征可以由大量气溶胶粒子在时间和空间上的运动状态来描述,相干激光测风雷达对其中浓度较高的气溶胶的 Mie 散射后向回波敏感度高,能够从回波信号的多普勒频移量中提取风速信息,且具备较高的时空分辨率、探测精度和灵敏度^[2-3]。大气湍流是大气中的粒子相对大气整体平均运动的一种不规则运动,且晴空湍流具有不易发现、可避免性差的特点,导致空气的流动状态显著改变,具体表现为风场速度的剧烈随机波动^[4]。因此,激光雷达对风场速度探测的准确性是基于风速检测湍流的方法的前提^[5]。湍流对传输中的激光束起吸收、散射作用使光束产生分裂、闪烁、扩展等变化,影响脉冲激光雷达的测速性能,如何准确估计出湍流风场中的径向风速是一个亟待解决的问题。

为了提高激光测风雷达在湍流风场中的测速表现,可以在速度估计的过程中考虑激光发射脉冲的距离权重函数的作用。沿径向方向代表单个距离门速度的统计平均值有不同的表达方式,简单的由中间位置层的速度估计表示该距离门的速度值随机性较大,而从高斯激光脉冲传输特性的角度出发,通过各距离单元处的速度值与脉冲传输距离函数卷积的过程,可以有效提高雷达在复杂湍流风场中的测速表现。

1 相关研究工作

激光雷达速度测量的影响因素以及与湍流的关系有很多学者进行了研究。1994年,Frehlich等^[6]基于控制变量的方法得出激光雷达测速误差与工作波

长成比例,较优的估计需要发射足够多数量的光电子,而波长较短的激光脉冲工作时其速度估计误差对光电子数的依赖程度较弱的结论。1995年,Frehlich^[7]在固定的风场条件下比较 $2\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 的多普勒激光雷达的风速估计性能,面对激光脉冲或大气环境等不同情况选取不同的激光波长。2007年,张文涛^[8]讨论了湍流导致激光信号在信道传输时可能产生的光束抖动、强度起伏闪烁等大气湍流效应及其影响机制,但未探讨与激光多普勒效应的关系及有效解决方案。2008年,杨瑞科^[9]等人讨论了有无湍流时对激光雷达直接探测的信噪比要求,分析了湍流强度、内尺度及探测点偏离波束中轴的距离等因素造成的影响,提出通过增加发射孔径的方式减少性能损耗,但物理实现过程中孔径的增加空间有限。2009年,陈柏伟^[10]基于激光雷达的谱宽数据与风速波动的关系分析湍流信息,由于引起频谱展宽的原因很多,该方法提取湍流特征的准确性还需要验证。2013年,香港国际机场^[11]使用基于结构函数的低空湍流预警算法,用平面拟合法处理速度均值,不可避免会在一定程度上弱化湍流速度波动幅度而造成结构函数的计算偏差,究其原因是在风场平面拟合之前没有考虑湍流风场对激光雷达测速性能的影响。2016年,吴松华^[12]课题组用实验证明了激光雷达提取湍流风场特征的可能性,描述了激光雷达在获取湍流风速变化过程的表现,以及不同大气条件下的外场探测结果。

文中深入研究激光雷达回波信息估计风速的原理及过程,以我国自主研发的 $1.55\ \mu\text{m}$ 脉冲相干多普勒激光测风雷达 (Pulsed Coherent Doppler Wind Lidar,PCDWL)为实验平台,对接收到的激光脉冲回波信息以距离门为单元进行频率估计,通过功率谱峰值的位置提取多普勒频移。分别用线性直接平均和基于脉冲特性的权重平均两种空间速度平均形式来描述风场平均速度,最后对比不同的平均近似方

式作用于湍流风场速度估计的均值和标准差, 结合线性拟合曲线得到最具代表性的径向速度分量的平均估计值。将理论分析和机场终端区激光雷达真实探测的激光信号回波信息相结合, 在有湍流的风场中讨论了不同的速度统计量空间平均估计的方法, 结合飞机飞行报告中遭遇湍流的情况, 提出湍流平均风速基准的空间速度平均方式, 优化了激光雷达对湍流过程的探测性能。

2 相干脉冲激光雷达系统

2.1 多普勒速度测量原理

风场速度体现在由气溶胶粒子的相对运动引起的激光信号的频率偏移量。全光纤相干脉冲激光雷达的接收系统将气溶胶粒子后向散射的回波信号与较大幅度的本振光混频, 用光外差探测技术获取其中的差频信息, 得到风场中有限测量体积内风速的空间平均分布^[13], 从而估计大气湍流过程的有效风速值。回波信号与发射激光脉冲间存在多普勒频移 f_D , 由此解算出的多普勒激光雷达径向速度 v 就是表征湍流风场状态的大气运动径向分量^[14]:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \quad (1)$$

式中: f_D 为多普勒频移; λ 为发射激光波长; v 为径向速度。

2.2 激光雷达脉冲特性分析

PCDWL 主振激光器发射的高斯脉冲光束经过长距离大气传输, 被探测目标反射形成后向散射信号光。已有激光雷达系统的脉冲特性如表 1 所示。雷达扫描方式采用传统的平面位置显示 (Plan Position Indicator, PPI) 扫描, 具备全方位探空视野。

表 1 相干多普勒测风激光雷达的脉冲参数

Tab.1 Main parameters of pulsed coherent Doppler wind lidar system

Parameter	Value
Wavelength/nm	1 550
Sampling interval/ns	2.5
Laser pulse width/ns	200
Pulse repetition frequency/kHz	10
Accumulated pulse number	5 000

用单个激光脉冲在固定时间间隔 T 内对速度进行估计, 将激光脉冲在照射区域内行进的距离 Δp 定义为径向速度的距离门大小:

$$\Delta p = MT_s c/2 = Tc/2 \quad (2)$$

式中: M 为采样点数, 这里选取与大气分层个数相同; T_s 为采样间隔。因此, 径向速度估计是脉冲照射单元内瞬时速度 $v(r, t)$ 的空间平均, 其中 r 为沿激光发射轴的距离, t 为测量时间。

风场理论上的状态在测量时间内满足泰勒湍流风场冻结理论, 单个雷达脉冲由脉冲宽度引起的空间延伸 Δr 取决于发射脉冲的瞬时功率曲线^[15]且符合高斯型曲线:

$$P_L(t) = P_0 \exp(-t^2/\sigma^2) \quad (3)$$

式中: P_0 为最大值功率; σ 为发射激光脉冲的束腰宽度。雷达脉冲的半高全宽 (FWHM) 定义了激光脉冲沿着发射轴的有效空间展宽, 表示为:

$$\Delta r = \sqrt{\ln 2} c \sigma \quad (4)$$

雷达发射脉冲决定了时间起点位置 $t=0$, t 表示脉冲时间, 则激光雷达脉冲的距离权重函数 $W(t)$ 表示如下:

$$W(t) = P_L(t - 2r/c) = \int_{-\infty}^{\infty} T(R) \exp\left\{-\frac{(R-r)^2}{c^2 \sigma^2}\right\} dR \quad (5)$$

其中函数 $T(R)$ 可以用高斯近似方法^[16]来表示:

$$T(R) = T_0 \exp\left\{-\frac{R^2}{c^2 \sigma^2}\right\} \quad (6)$$

式中: T_0 为函数最大值。

将公式(6)代入公式(5)中得到表示激光雷达脉冲传播过程的高斯型脉冲距离权重函数^[17]:

$$W(r) = P_0 \exp\left\{-\frac{4r^2}{c^2 \sigma^2}\right\} \quad (7)$$

图 1 表示了激光脉冲信号在 300 m 和 900 m 位

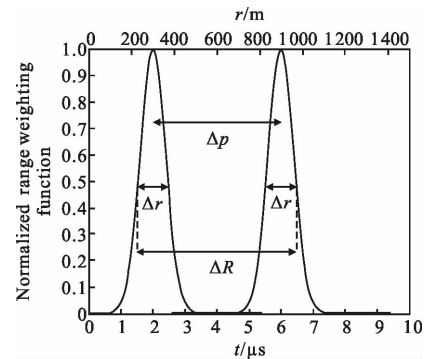


图 1 激光高斯脉冲距离权重函数

Fig.1 Normalized range weighting function for a Gaussian pulse

置处的归一化脉冲距离权重函数,脉冲的 FWHM 是 Δr ,在 $4 \mu\text{s}$ 时间内脉冲经过的距离是 Δp ,其中脉冲的距离分辨率 $\Delta R = \Delta r + \Delta p$ 。

激光雷达对湍流风场测速受两个因素影响,一方面是发射的激光脉冲,另一方面是随机大气风场。由于大气风场的不确定性,那么在估计湍流径向风速时,考虑激光脉冲延径向传播过程中照射到气溶胶粒子的统计特性是十分必要的^[18]。

3 湍流风场速度估计

3.1 基于大气分层的速度统计量

在特定的湍流风场中,距离门内每个距离单元处的径向速度估计 $\hat{v}(z)$ 的统计表现依赖于估计器性能。选择优化测速误差能力较好的最大似然估计 (Maximum Likelihood, ML) 方法对时域采样后的雷达接收信号进行频率估计^[19],使得反演出的风速在对数似然函数最大化的条件下逼近真实风速。

根据湍流风场中气流剧烈运动的特点,从大气分层的角度,累加距离门内的非相干后向散射信号,以固定采样点数滑动估计的方式,对距离门进行分层, $v(z)$ 表示距离门内每个距离单元处的径向风速。那么,代表该距离门位置的径向速度值可以用局部分层速度的统计量来表示,一个简单的表示方式是取中间位置速度层的速度值:

$$v_{\text{cen}} = v(R') \quad (8)$$

式中: R' 表示速度点与雷达之间延径向方向的距离。距离门内速度统计量基于各分层速度的和:

$$S_v = \sum_{\Delta p} v(z) \quad (9)$$

3.2 湍流风速的线性平均方法

在雷达脉冲探测的一个距离门内,对径向速度 $v(z)$ 的统计描述可以用观测时间内激光脉冲穿过的距离 Δp 范围的所有统计量 $v(z)$ 的方差 σ_{urb}^2 来表示:

$$\sigma_{\text{urb}}^2 = \frac{1}{\Delta p} \int_{R'-\Delta p/2}^{R'+\Delta p/2} \langle [v(z) - v_{\text{lin}}]^2 \rangle dz \quad (10)$$

式中: v_{lin} 为距离门内径向速度的线性加权平均,满足下面的关系:

$$v_{\text{lin}} = \frac{1}{\Delta p} \int_{R'-\Delta p/2}^{R'+\Delta p/2} v(z) dz \quad (11)$$

在距离门长度 Δp 内做局部的速度线性平均,线

性平均是一种常用的平均处理方法,算法原理清晰且运算的时间成本相对较低。

3.3 湍流风速的脉冲距离权重平均方法

激光脉冲在传播过程中,当移动的距离超过脉冲本身的有效宽度 Δr ,即照射到一组新的气溶胶粒子,因此可以认为相邻的雷达回波信号是相互独立的。在脉冲重复频率足够高(文中采用 10 kHz)的条件下,由于大气相关时间约为 1 s,单个脉冲对气溶胶粒子的采样之间满足统计独立。任意时刻的风场速度都是随机分布的,不同时刻的雷达后向散射信号的协方差是风场速度的非线性函数。那么,对风场速度的空间平均做近似估计时,一个有效的方法是考虑包括雷达脉冲的有限空间延伸 Δr 和观测时间内脉冲移动的距离 Δp 的脉冲距离权重函数的作用。

假设激光雷达满足发射的波束窄、系统增益连续的条件,那么在距离 z 处一个以脉冲为中心的平均速度的近似形式可以表示如下:

$$v_{\text{pulse}}(z) = \int_0^{\infty} v(s) I_n(z-s) ds \quad (12)$$

式中: $I_n(z) = \frac{W(z)}{\int_{-\infty}^{\infty} W(r) dr}$ 为激光雷达脉冲的距离权重

函数。此时,在单激光脉冲测量的一个距离门内,从脉冲权重速度的角度出发对空间平均速度的估计如下:

$$v_{\text{wgt}}(R) = \frac{1}{\Delta p} \int_{R'-\Delta p/2}^{R'+\Delta p/2} v_{\text{pulse}}(z) dz \quad (13)$$

式中: v_{pulse} 为上文提到的经过脉冲距离权重函数卷积的速度。在未考虑脉冲累积的情况下,多普勒激光雷达信号由发射单次强脉冲产生。当湍流发生时,在雷达脉冲探测单元内的风场存在明显的速度波动,造成回波信号不稳定,对速度估计之后特征平均速度的选取有更高的要求。以上估计距离门内平均速度的近似方法的准确性通过激光雷达在真实风场中的探测表现来具体分析。

3.4 性能分析

多普勒激光雷达探测大气风场时,接收机接收到的后向散射场是由大量气溶胶粒子的微弱后向散射信号叠加形成的,需要用频谱估计方法对这高斯随机过程进行统计平均处理得到实际湍流发生位置与雷达相对方位的有效径向速度廓线。将激光雷达实测值视为原始数据,将湍流风速的线性平均方法

和脉冲距离权重平均方法视为对比值。通过衡量两随机变量间相关程度的相关系数(R)来分析方法的有效性, R 的计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

通过衡量离散程度的标准差(SD)来评价方法的稳定性,SD的计算公式为:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (15)$$

式中: x_i 为两种方法在各距离门处的速度估计值; \bar{x} 为对应的径向风速廓线上的速度平均值; y_i 为原始风速在各距离门处的速度值; \bar{y} 为对应的径向风速廓线上的速度平均值; n 为距离门内数据个数。

4 实验和结果分析

2016年6月至今,采用的是 $1.55 \mu\text{m}$ 全光纤相干激光测风雷达系统在兰州中川国际机场内做湍流和风切变测量实验,这是国内激光雷达进入民航机场进行湍流和风切变的首例。激光雷达实际工作环境及状态如图2所示,系统实际的运行参数如表1所示。



图 2 雷达测量实物图

Fig.2 Diagram of lidar measurement

实验选取了2016年7月至12月期间的6次有机组报告遭遇到湍流期间的激光雷达数据,分别将文中方法和线性平均方法应用到数据中。其中包括2016年9月10日15点的雷达PPI径向扫描数据,结合当日进离港机组对飞行中遭遇湍流情况的报告,在湍流发生方向范围内,固定距离门 $\Delta p=30 \text{ m}$,去除信噪比 $\text{SNR} \leq -20 \text{ dB}$ 无效数据,该次测量使用

PPI扫描方式下5条径向线上约覆盖 25° 方位角范围的径向数据,经过筛选得到一条径向风速廓线。风速值随着与雷达位置距离的增大而变化的情况如图3所示,从风速廓线中可以明显看出该处风场风速的不均匀特征。

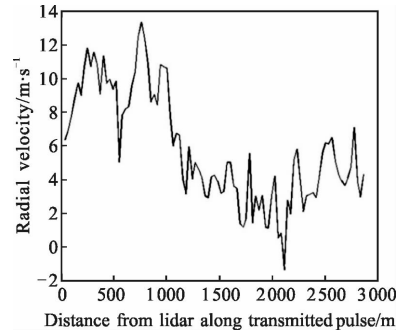


图 3 湍流风场风速

Fig.3 Wind speed of turbulence wind field

激光雷达系统的脉冲累加次数为5000次,发射脉冲中心频率为80 MHz,图4为一组单距离门的频率最大似然估计(ML)结果,提取多普勒频移值反演视线风速,选择不同区域的采样点即可求得距离门内各距离单元的速度分布。

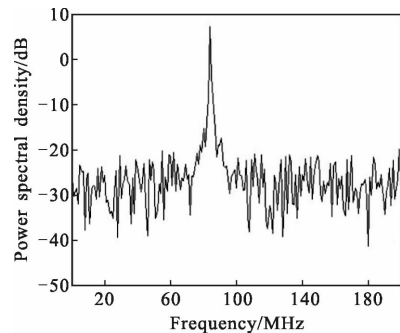


图 4 回波信号的功率谱分布

Fig.4 Power spectrum distribution of echo signal

分别采用文中方法 v_{wgt} 和线性相关法 v_{lin} 对激光雷达径向各距离单元处的风速进行风速估计(横坐标轴),并与距离门中心位置速度值 v_{cen} 即雷达实际测量结果(纵坐标轴)进行对比,相关性如图5所示,蓝色和红色的散点分别代表 v_{lin} 与 v_{wgt} 方法估计的速度值分布,直线则表示它们同距离门中心位置速度的拟合关系。在有明显湍流的情况下, v_{lin} 方法和 v_{wgt} 方法得到的速度估计的相关系数分别为 $R_{v_{\text{lin}}} = 0.9753$

和 $R_{wgt}=0.9827$, 结果表明 v_{lin} 与 v_{wgt} 两种平均方法与原径向速度都有较强的相关性, 较好地保留了原始风场的湍流特征, 风速估计方法是有效和可行的。

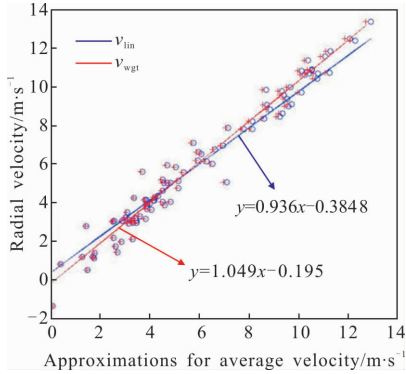


图 5 空间平均径向风速大小对比

Fig.5 Comparison of spatial average of radial wind velocity

通过径向上不同位置的一一对应关系进行数据对比, 得到的各近似平均速度曲线如图 6 所示。

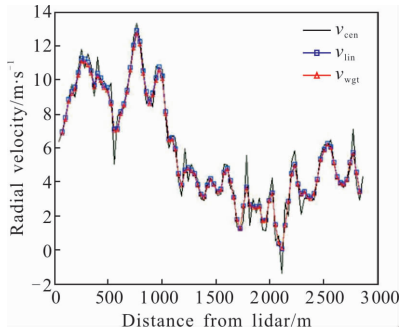


图 6 激光雷达径向速度空间平均结果

Fig.6 Spatial average results of lidar radial velocity

图 6 中曲线 v_{cen} 是表达径向速度通常选取的中心位置速度替代方式, 也是激光雷达实测速度值。可以看出两种空间平均方法得到的速度近似曲线与 v_{cen} 的拟合度都很高, 其中 v_{wgt} 方法在局部波动剧烈的位置平均效果更好。如图在距激光雷达 1800 m 附近, 约第 59 个距离门内, 由于距离单元速度波动剧烈, 传统的中心位置速度表示方法有明显尖峰值, 而 v_{lin} 和 v_{wgt} 曲线都没有受峰值点的影响, 且与初始风速廓线的起伏情况较为一致。

总结在 6 次机组报告飞行颠簸情况下文中方法估计的风速廓线实验结果, 从平均速度和标准差的角度评估两种方法的表现, 结果如表 2 所示。

表 2 两种算法的表现

Tab.2 Performance of two algorithms

No.	v_{max} /m·s ⁻¹	v_{min} /m·s ⁻¹	Average velocity /m·s ⁻¹		Standard deviation/m·s ⁻¹	
			v_{lin}	v_{wgt}	v_{lin}	v_{wgt}
1	13.67	-1.72	5.90	5.81	3.21	3.16
2	9.53	-3.24	4.18	4.02	2.94	2.78
3	10.84	-2.36	3.81	3.85	2.90	2.73
4	8.21	-5.13	1.79	1.71	3.04	2.91
5	11.56	-0.57	4.72	4.67	2.62	2.51
6	9.85	-3.74	3.26	3.15	2.33	2.17

其中 v_{max} 是当次测量获得的有效风速廓线上的最大速度值, v_{min} 是最小速度值。在 6 次湍流过程中, v_{wgt} 的标准差都小于 v_{lin} , 说明 v_{wgt} 方法对平均速度的近似结果更加稳定, 处理湍流风速时能够最大程度地保留风场局部特征。分析原因为激光脉冲与气溶胶粒子的作用过程及其后向散射回波都受到脉冲特征的影响, 在风速估计过程中体现这些信息有利于激光雷达对湍流风场的精细探测。另一方面, 用传统的 PPI 扫描方式在获得更多探测视野^[20]的同时耗费了时间成本, 在考虑湍流的时变性和耗散率的情况下, 线性平均方式的计算量相对脉冲权重平均速度要小一些, 但前提是损失了一定程度的准确性, 而后者所体现的局部速度平均更符合真实风场的情况, 因而能够在保证距离门速度不被异常尖峰值干扰的前提下提高湍流预警算法的敏感度。

由于直接用距离门中心位置的径向速度代表该距离门的风速存在不稳定性, 从而导致求湍流风场平均基准风速时产生偏差, 对基于风场速度的湍流检测过程会带来较大影响。因此, 实际雷达在测量径向速度时考虑激光脉冲距离权重函数对风场测速的影响, 修正后的方法可以一定程度上降低偏差, 其中脉冲权重估计对降低湍流的影响有更明显的作用。

5 结论

激光雷达的激光脉冲属性是影响其测速性能的重要方面。文中对回波信号进行了 ML 离散谱峰值估计, 分析了脉冲权重函数的高斯特性, 用传输特性来表达湍流径向风速的统计平均值, 提出了一种基

于脉冲函数的空间平均速度估计方法, 并与传统的线性近似估计方法进行了对比, 使用平均速度的标准差及平均速度与随机径向速度的相关系数和标准差来衡量算法性能。实验结果表明, 两种算法在与大气分层速度统计量相关性足够好的条件下, 解决速度空间平均问题都是有效的。其中基于脉冲权重函数的近似算法的标准差更小, 可以在发生晴空湍流的风场中考虑全局的速度波动从而精确化风速测量结果, 为后续晴空湍流检测中获取风场波动特征提供基础。实验结论对分析湍流过程和风场运动状态, 检测和预警湍流的发生进而保障民航飞行安全有重要的现实意义和应用价值。

参考文献:

- [1] Hu Xinyan. Detection clear air turbulence with lidar and data processing using EMD [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. (in Chinese)
胡新艳. 晴空湍流激光雷达探测及 EMD 数据处理 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [2] 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. (in Chinese)
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.
- [3] Wang C, Xia H, Shanguan M, et al. 1.5 μm polarization coherent lidar incorporating time-division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20663-20674.
- [4] Mycek P, Gaurier B, Germain G, et al. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part I: One single turbine[J]. *Renewable Energy*, 2014, 66: 729-746.
- [5] Liu Jianhua, Jiang Nan, Wang Zhendong, et al. Multi-scale coherent structures in turbulent boundary layer detected by locally averaged velocity structure functions [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2005, 26(4): 456-464. (in Chinese)
刘建华, 姜楠, 王振东, 等. 用局部平均速度结构函数检测湍流边界层多尺度相干结构 [J]. *应用数学和力学*, 2005, 26(4): 456-464.
- [6] Frehlich R G, Yadlowsky M J. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(5): 1217-1230.
- [7] Frehlich R G, Yadlowsky M J. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(5): 1217-1230.
- [8] Zhang Wentao, Zhu Baohua. Reseach on the laser beam through turbulence atmosphere channel [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(4): 784-787. (in Chinese)
张文涛, 朱保华. 大气湍流对激光信号传输影响的研究 [J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(4): 784-787.
- [9] Yang Ruike, Liu Qi, Ma Chunlin. Analysis of the influence of atmospheric turbulence on lidar direct detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 137-140. (in Chinese)
杨瑞科, 刘琦, 马春林. 大气湍流对直接探测激光雷达性能影响分析 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 137-140.
- [10] Wong C C, Chan P W, Akaeda K, et al. Calculation of turbulence intensity based on spectrum width data of a Doppler Lidar [C]//Fourth Symposium on Lidar Atmospheric Applications, 2009.
- [11] Hon K K, Chan P W. Application of Lidar-derived eddy dissipation rate profiles in low-level wind shear and turbulence alerts at Hong Kong International Airport [J]. *Meteorological Applications*, 2014, 21(1): 74-85.
- [12] Wu S, Yin J, Li R, et al. Observations and analysis of turbulent wake of wind turbine by coherent Doppler lidar[C]//EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2016, 119: 14007.
- [13] Diao W, Zhang X, Liu J, et al. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 072801.
- [14] Wang Guocheng, Sun Dongsong, Duan Lianfei, et al. Analysis of factors affecting the data accuracy of Doppler wind lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0901003. (in Chinese)
王国成, 孙东松, 段连飞, 等. 多普勒测风激光雷达风场数据影响因素分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0901003.
- [15] Frehlich R. Coherent Doppler lidar signal covariance including wind shear and wind turbulence[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(27): 6472-6481.
- [16] Shelekhova E A, Shelekhov A P. Numerical model of radial wind velocity in case of Gaussian approximation of range weighting function [C]//17th Coherent Laser Radar

- Conference. Barcelona, Spain, 2013: 17–20.
- [17] Frehlich R, Hannon S M, Henderson S W. Coherent Doppler lidar measurements of wind field statistics [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1998, 86(2): 233–256.
- [18] Shelekhova E A, Shelekhov A P. Statistics of a coherent lidar signal in a turbulent atmosphere [J]. *Optics and Spectroscopy*, 2013, 114(2): 314–319.
- [19] Wang Jiqiang, Zhang Chunxi, Ma Zongfeng, et al. Cramer-Rao lower bounds of parameter estimation from laser Doppler velocimetry[J]. *Chin J Lasers*, 2008, 35(9): 1419–1422. (in Chinese)
- 王纪强, 张春熹, 马宗峰, 等. 激光多普勒测速参数估计的 Cramer-Rao 下限[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1419–1422.
- [20] Diao Weifeng, Liu Jiqiao, Zhu Xiaopeng, et al. Study of all-fiber coherent Doppler lidar wind profile nonlinear least square retrieval method and validation experiment[J]. *Chin J Lasers*, 2015, 42(9): 0914003. (in Chinese)
- 刁伟峰, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0914003.