

先验平滑方法在相干测风激光雷达中的应用

李 路 郭 磐 张寅超 陈思颖 陈 和

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 相干测风激光雷达通常采用周期图最大值法,但在远场低信噪比区域是有偏估计,因而会增加风速测量误差。距离门功率谱基线漂移现象作为误差源之一,会偏置谱峰分布基准,并干扰峰值频率检测。为了校正基线漂移,提出了基于正则化惩罚最小二乘法的先验平滑估计频谱基线方法。经过大气测风实验应用,结果表明,该方法能有效校正基线漂移,从而显著提高远场风速的估计精度,并最终提升了测风激光雷达的探测距离。

关键词 遥感; 测风激光雷达; 多普勒频移估计; 周期图最大值法; 先验平滑方法; 频谱基线校正

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0728001

Application of Smoothness Prior Approach for Coherent Doppler Wind Lidar

Li Lu Guo Pan Zhang Yinchao Chen Siying Chen He

School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The periodogram maximum estimator is usually employed in coherent Doppler wind Lidar. However, the estimates are biased in the far-field with low signal-to-noise region, and the wind speed errors will increase. The baseline-drift of the range gate power spectra is one of the error items, which biases the benchmark of spectral peak distribution and interferences the peak-frequency detection. In order to correct the drifting, the smoothness prior approach based on the regularization penalized least squares is introduced to estimate the spectral baseline. In the atmospheric wind speed measurements, the result shows that the proposed approach can remove the drift baseline effectively, improve the wind speed estimation precision in far-fields significantly and increase the detection range of the wind Lidar ultimately.

Key words remote sensing; wind Lidar; Doppler-shift estimation; periodogram maximum; smoothness prior approach; spectral baseline correction.

OCIS codes 280.3340; 280.3640; 040.2840

1 引 言

大气风速是一项重要的气象学要素,测量全球大气风场对研究地球气候变化、提高数值天气预报精度具有十分重要的意义^[1-2]。尤其是对与人类活动密切相关的对流层内的水平风速垂直分布的测量,一直是世界各国迫切需要但又尚未实现的一项工作^[3-4]。相干测风激光雷达以其高探测精度、高时空分辨率、大探测范围,并能在晴空条件下工作的特点得到了越来越多的研究和应用,并很有可能成为首个在空间平台直接探测全球大气风场的主动式遥感设备^[5-8]。相干激光雷达以随风场输运的大气气溶胶粒子作为示踪物质,利用发射激光与气溶胶粒子相互作用产生的多普勒效应进行风速测量。多普勒频移量与风速大小直接相关,因而多普勒频移估计成为了激光雷达信号处理的主要工作。

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-03-28

基金项目: 总装预研基金(513210604)

作者简介: 李 路(1986—),男,博士研究生,主要从事相干测风激光雷达技术、激光光谱技术等方面的研究。

E-mail: leelu@bit.edu.cn

导师简介: 张寅超(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事激光雷达大气遥感、激光光谱技术等方面的研究。

E-mail: ychang@bit.edu.cn

通信联系人。E-mail: guopan@bit.edu.cn

当前多普勒频移估计方法主要有周期图最大值法(PM)、最大似然法(ML)^[9]、非线性自适应估计法(NADSET)^[10]及与其互补的单边估计法(Left-Sided NADSET)^[11]。其中,PM方法无需复杂的参数调节,对探测距离较近的高信噪比(SNR)回波信号(简称近场信号),按多脉冲周期图累加平均估计的风速是无偏的,并且即便只有少量脉冲参与累加,估计精度也能保持很高^[12],因而在实际系统中得到广泛应用。但其缺点是,当回波信号极其微弱时,如远场信号,风速估计是有偏的,为保证估计精度,通常需要累加大量脉冲的回波功率谱以提高信噪比^[10]。然而,如此操作又会降低风速的时间分辨率。ML方法是把多个观测值的联合概率分布视为待估计函数,进而求出使这些观测值出现概率最大时的参考值。这种方法估计精度高,结果最接近Cramer-Rao估计下限,但其需要的信息也较多,算法复杂度高,处理速度慢,实用化较为困难。NADSET系列算法是根据风速的连续变化特性,标记出信噪比显著低于临近区域的距离单元(这些距离单元的多普勒频移估计具有显著偏差),利用临近SNR较高区域的多普勒频移估计,计算其归一加权均值作为低SNR距离单元的频移估计^[10]。这些列算法虽然能够有效校正突变低SNR区域的有偏多普勒频移估计,但其算法复杂度很高,仅NADSET算法就需要七个参数进行调整;而要获得整个探测距离上的优化估计,还需要NADSET和Left-Sided NADSET两种算法配合使用^[11],参数的优化选取会更加复杂和困难。本文基于PM的多普勒频移估计方法,主要针对功率谱的特点分析了频移估计误差的根源,并将先验平滑滤波器应用于功率谱去噪和背景扣除中。结果显示,这一技术能够有效扣除周期图功率谱的漂移背景,从而提高远场多普勒频移估计精度,而且由于只需要调节一个参数,算法易用性较高。

2 相干测风激光雷达基本原理

2.1 系统硬件构成及工作原理

相干激光雷达通常采用的激光波长有1.064^[13]、1.5^[14]以及2 μm^[15]。与1.064 μm激光相比,1.5 μm和2 μm对人眼安全性较高;而与2 μm激光相比,1.5 μm处在光通信波段,有大量的商品化器件(光纤及探测器)可供使用。因此,1.5 μm激光器的相干激光雷达越来越受到人们重视,并被应用到各种速度测量研究中^[16-18]。实验采用一套1.54 μm全光纤相干多普勒激光雷达系统,其系统结构如图1所示,主要包括激光发射机、光学天线、信号探测与处理三部分。由种子激光器产生的1.54 μm连续光波(CW)被分成两部分,其中一小部分作为外差探测的本振光源,其余部分经声光调制器(AOM)调制成具有55 MHz中频偏置的种子脉冲光注入到光纤放大器中。经光纤放大器放大的脉冲光通过望远镜发射到大气中,与大气气溶胶相互作用产生的后向散射光被同一望远镜收集,此后向散射光已携带表征风速信息的多普勒频移;继而,光环行器作为收发开关将后向散射光从发射光路中分离,通过保偏光纤传输到3 dB定向耦合器与本振光进行混频。混频产生的两束强度相同、位相相反的混频光,经过平衡探测器转换为电信号并作差分放大形成差模信号。理论上,此差模信号仅包含多普勒频移信息的交流电信号。利用AD转换器将模拟交流信号采集量化为数字信号,并传输到信号处理器中通过频谱计算解析出功率谱密度(PSD)、多普勒频移、径向风速与风向等信息。系统各部分主要参数如表1所示。

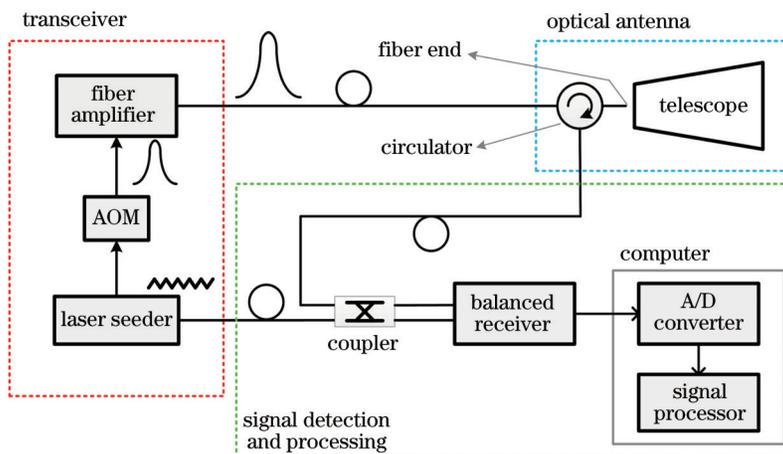


图1 相干测风激光雷达系统原理结构框图

Fig.1 Structure diagram of coherent wind Lidar system

表 1 实验系统主要参数

Table 1 Specifications of the experimental system

Parameters	Value
Wavelength / μm	1.542
Pulse energy / μJ	30(Typical)
Pulse width /ns	500
Pulse repetition rate /kHz	10
Intermediate frequency /MHz	55
Local oscillator power /nW	300(Typical)
Telescope aperture /mm	100
Detector	InGaAs balanced detector
ADC sample rate /MHz	550
ADC sample bits /bit	12

2.2 信号探测与处理方法

相干测风激光雷达直接探测激光发射方向上的风速分量,即径向风廓线;而要获得径向风廓线,就需要计算光脉冲飞行路径上沿途各个风速点,因此需要将连续采集的后向散射光信号按对应飞行距离划分为若干数据片段,每一个数据片段称为一个距离门。距离门长度划分需要兼顾风速分布距离分辨率和风速频谱分辨率。根据傅里叶变换频谱分析理论,距离门越长,频谱分辨率越高,但却导致距离分辨率下降;而距离门的最小长度又要大于激光脉冲的空间分布长度。实验中,综合考虑风速分辨率和距离分辨率的指标要求,最终以每 512 点采样数据对应的距离(139.6 m)为一个距离门,混频信号与距离门划分结果如图 2 所示,需要注意,相邻两个距离门有一定程度的数据重叠(此处重叠率为 50%)以平滑风速测量结果。

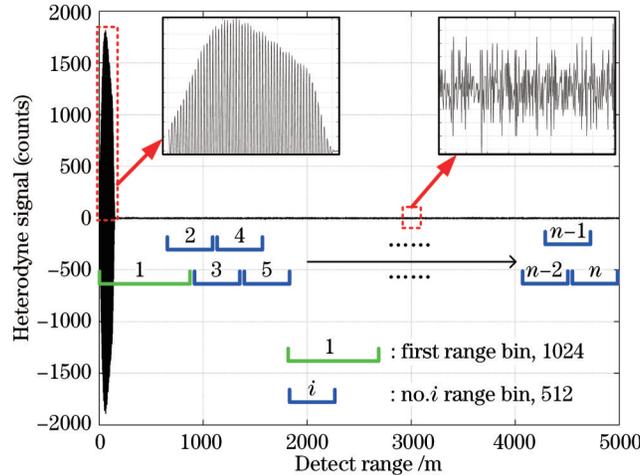


图 2 混频信号及距离门划分示意图

Fig.2 Division diagram of mixing signal and range gating

由于系统收集到的大气后向散射光信号非常微弱,为了提高系统信噪比,需要按对应距离门将多个脉冲的大气散射回波进行频谱累加,进而从累加功率谱中提取多普勒频移信息^[7, 19]。于是,整个信号处理流程如图 3 所示。

在图 3 数据处理流程中,激光频率质量控制是指通过拍频分析来判断 AOM 偏置的实际参考中频是否位于抖动容许区间,进而确定种子光是否成功注入光放大器。一般采用光学元件表面反射的杂散光(图 1 光纤端面的后向反射光)与本振光进行拍频,然后计算拍频信号功率谱的峰值频率即为实际参考中频。在数据处理中,第一个距离门可以选取较长一些的数据片段(比如 1024 点,如图 2 所示)以提高参考中频的计算精度^[7]。

2.3 周期图功率谱的背景扣除

在用周期图法估计多普勒频移的研究中,一些研究者认为最后一个距离门大气回波信号的强度已经十分微弱,可以认为主要由噪声构成,因而对其功率谱进行累加即可作为频谱背景噪声,随后从前面各距离门

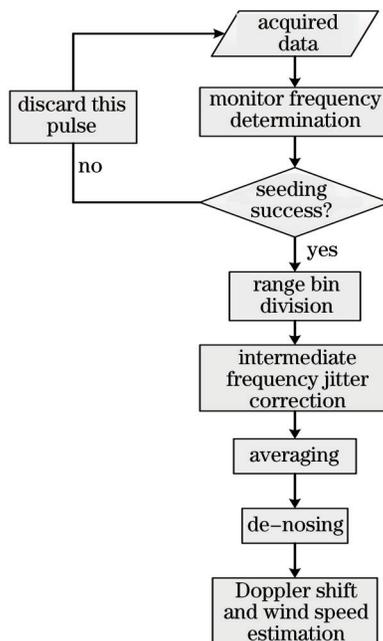


图3 相干测风激光雷达数据处理流程

Fig.3 Data processing for coherent wind Lidar

信号功率谱减去这个背景谱,就可以提高各距离门尤其是远场距离门的多普勒频移估计精度^[19-21]。图4为400个脉冲回波信号的累加平均功率谱,可以看出,两个距离门的累加平均功率谱在全谱宽频带整体呈现一种近似指数律上升的趋势,即频谱基线发生了漂移。其中图4(a)为最末距离门功率谱在以55 MHz为参考中频(即AOM偏置中频)的目标窄频带(55±25MHz)内已无明显可辨谱峰出现,因此将其作为噪声背景谱是有意义的(目标窄频带是根据风速测量范围要求计算得到);图4(b)为第5个距离门的原始功率谱减去背景谱后,基线漂移得到了一定程度的修正。以此类推其它各个距离门的情况,则这种扣除背景谱的方法实质是通过频谱基线校正来克服漂移趋势对窄频带谱峰频率检测的影响。

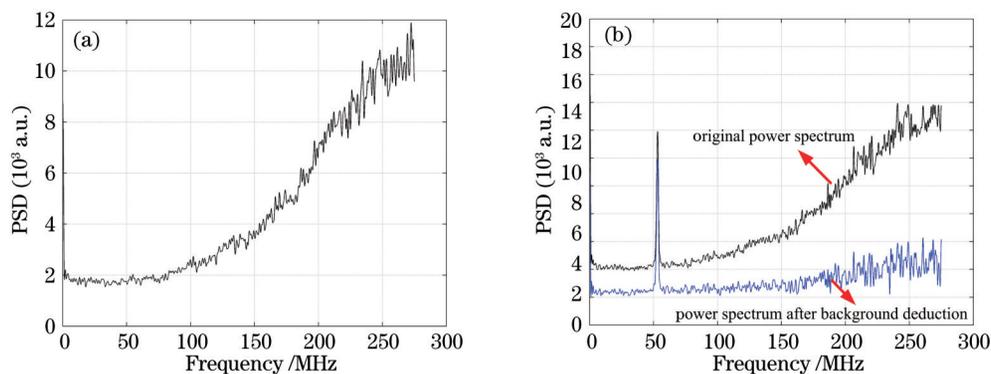


图4 由400个脉冲回波信号累加平均功率谱。(a) 最末距离门的平均功率谱; (b) 第五个距离门的平均功率谱

Fig.4 Average power spectra using 400 pulses for averaging. (a) Average power spectrum of last range bin;

(b) average power spectrum of the fifth range bin

图5显示了对各距离门功率谱扣除背景谱后的径向风速估计与未扣除背景谱风速估计的结果对比。由于实验环境是晴空阵风天气,根据气象学测量经验,此种条件下的局域风场应该是连续平缓变化,几乎不会出现图5中4~5 km范围所呈现的风速突变现象。这种情况的出现主要是由窄频带谱峰频率估计误差引起的,因此削弱噪声和基线漂移对远场距离门功率谱的影响对提高谱峰频率检测至关重要。另外由图5还可以发现,上述扣除最末距离门功率谱来消除基线漂移的方法对提高风速估计精度的效果并不显著。而从图4(b)也可以发现,采用这种方法后的功率谱仍有一定程度的基线漂移,其对近场距离门较强功率谱的峰频估计影响甚小,而主要影响的是远场距离门微弱功率谱的峰频估计,图5的结果对比已证明这一分析。

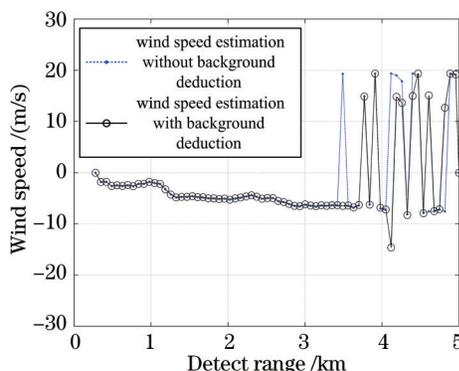


图5 扣除最末距离门功率谱对风速估计效果的对比

Fig.5 Wind speed estimations comparison before and after last range gate power spectra deduction

3 先验平滑滤波器频谱基线扣除方法

3.1 功率谱基线漂移根源分析

为了研究功率谱基线漂移原因,首先测量平衡探测器(PDB130C, Thorlabs)无光输入时的暗噪声,并进行频谱分析。图6(a)是400组(对应前述功率谱累加脉冲个数)平衡探测器暗噪声信号的功率谱,而图6(b)是400组功率谱累加平均后的结果。由图6可知,此探测器暗噪声并非平稳的高斯白噪声,而是有多个显著高频分量的有色噪声。关于这些高频分量,可能源于探测器中半导体材料的制造工艺、信号电路的寄生电容以及有限共模抑制特性等因素,此处仅关注噪声信号处理,对其物理根源并不作展开讨论。另外,如图6所示,单组噪声谱是以频谱坐标轴为基线,没有发生漂移,但由于显著高频分量的随机性,累加平均谱呈现出了逐渐上升的漂移基线。图4(a)最末距离门平均功率谱与此处的噪声平均谱表现出一致的分布特征,并且由于回波信号的衰减引起不同距离门本底信号强度的差异,所以单纯扣除最末距离门的或探测器暗噪声的累加平均功率谱未必能很好地消除基线漂移和提高风速估计精度,图5示例也证明如此。

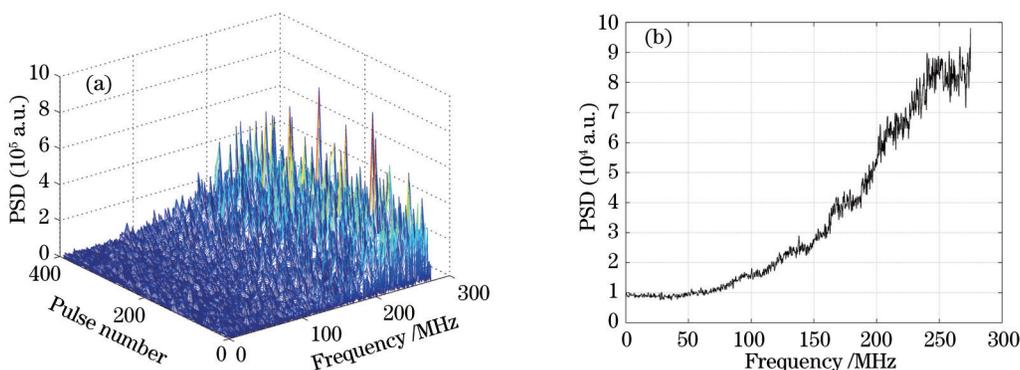


图6 (a) 平衡探测器暗噪声功率谱及;(b) 400组累加平均谱

Fig.6 (a) Dark-noise power spectra of the balanced detector and; (b) average among 400 measurements

3.2 先验平滑滤波器用于频谱基线校正

先验平滑滤波方法最初由 Whittaker^[22]于1922年提出,用于时间序列数据的平滑趋势估计。它实质上是一种惩罚最小二乘法,而其惩罚项则采用了 Tikhonov 正则化方案^[23]。Eilers^[24]在进行信号平滑和光谱基线校正^[25]研究时提出的广义化惩罚最小二乘函数表达式为

$$S(f) = (y - f)^T W (y - f) + \lambda (D_2 f)^T (D_2 f) = \sum_i w_i (y_i - f_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^2 f_i)^2, \quad (1)$$

式中 y 为输入信号矢量, f 为待估平滑信号, W 是以 w_i 为对角元的权重对角阵, $\lambda (> 0)$ 为正则参数, D_2 是对二阶微分算子 Δ^2 近似以用于数值计算的二阶差分矩阵,可表示为

$$D_2 = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

(1)式第一项是一般最小二乘法的目标函数,反映了待拟合信号 f 对原始信号 y 的保真度;第二项是采用Tikhonov正则化方法的惩罚项,反映了拟合信号 f 的平滑度。通过调节正则参数 λ ,即可对拟合信号的保真度和平滑度进行权衡。进而,求得(1)式的最小二乘解为

$$\hat{f} = (W + \lambda D_2^T D_2)^{-1} W y. \quad (3)$$

记 $L = (W + \lambda D_2^T D_2)^{-1} W$,则当 W 为单位阵时,通过傅里叶变换分析可知, L 具有低通滤波特性,并且随着 λ 取值增大,滤波器带宽会逐渐变窄,而输出信号也就越光滑,因此称 L 为先验平滑滤波器或Whittaker平滑器^[24-26]。此外,研究发现,对于不连续的数据片段(比如有元素缺失或者锐利谱峰的情况),将权重矩阵 W 中与不连续数据区域对应的对角元素 w_i 置为0,其他连续区域的仍置为1,则(3)式的输出信号不仅具有对连续区域进行平滑去噪的特性,还具有对不连续区域进行平滑插值的特性,而且插值信号能够维持两边信号的连续性。因此,通过改变 w_i 的权值即可应用先验平滑滤波器对频谱的漂移基线而非整体信号进行估计^[25]。进一步考察(1)式,这种基线估计的实质分析如下:对于已知基线的测量数据,要求其拟合信号同时具有保真度和平滑度;而对于数据不连续区域(如光谱峰区),其基线未知,则只能对此区域输出的拟合信号提出平滑度要求,而最终的效果则是对此区域自动进行了连续且平滑的插值。

为了应用先验平滑滤波器估计频谱基线,需要检测出不连续的谱峰区域并置其权重为0。然而,谱峰检测算法通常较为复杂,并且对于相干测风的远场距离门功率谱,目标频带内的有效谱峰十分微弱,很容易受噪声和漂移基线的干扰,对其检测更为困难。其实,若能有效检测出频谱谱峰,自然就可得到对应频率,基线校正已非必须。另一方面,相对于由数据采样频率决定的距离门功率谱全谱宽频带,目标窄频带总是可以根据风速探测范围预先确定。因此,可以直接将功率谱窄频带对应权值置为0,再应用先验平滑滤波器进行基线估计。

给出了先验平滑滤波器对两个距离门功率谱基线估计的示例,选取的两个距离门分别是近场距离门(第5号)和远场距离门(倒数第5号),基线估计结果如图7所示。由图7可知,将目标窄频带区域的权重元素置0后,先验平滑滤波器能够有效拟合出平均功率谱的漂移基线,而窄频带内的谱峰无论强弱都不会影响基线估计,并且其中的未知基线也被平滑连续地插值出来了。现在考察特殊情况,若窄频带谱峰已微弱到完全被噪声淹没如最末距离门的情况,则将 W 取为单位矩阵,先验平滑滤波器输出即图4(a)噪声平均功率谱的漂移基线。另一方面,根据上文论述,正则参数 λ 取值越大,拟合基线越平滑。综合两方面分析,对于窄频带有明显谱峰的近场距离门功率谱,若选取的 λ 已能够很好地估计出漂移基线,则这个 λ 对远场距离门微弱功率谱的基线一般也能进行很好的估计。这就意味着只要选取一个合适的正则参数 λ ,则整个探测范围内所有距离门功率谱都能得到有效的基线校正,从而大大减轻了参数调节的难度,图7所选的 λ 值均为 1×10^6 。关于 λ 的选取方法和 λ 对拟合信号线型及平滑度的影响,可以参考Eilers的相关论述^[24-25]。

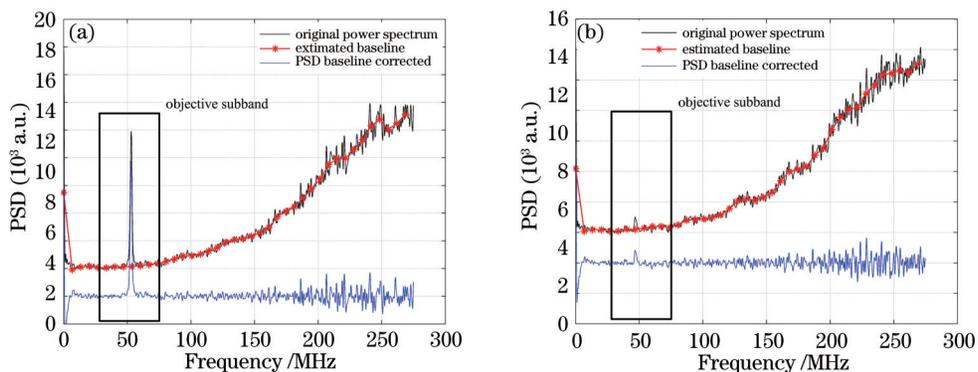


图7 应用先验平滑滤波器进行距离门平均功率谱基线校正。(a)近场距离门;(b)远场距离门
Fig.7 Baseline correction of corresponding range gate average power spectra using smoothness prior filter.
(a) Near-field range gate; (b) far-field range gate

4 实验结果及讨论

为了检验先验平滑基线校正方法的效果,将其应用于晴空大气风速测量实验的数据处理中。实验观测条件是2013年6月4日22:10~22:50,天气晴转多云,东南风4~5级(对应东南方向风速分量为5.5~10.7 m/s),相干测风激光雷达系统被安置在一高层建筑顶端,发射激光指向为 $\langle a, b \rangle = \langle 135^\circ, 0^\circ \rangle$,其中 a 是方位角, b 是望远镜仰角。应用先验平滑方法进行基线校正后的风速估计如图8所示,并与前述直接扣除最末距离门功率谱的估计结果进行了对比。由图8可知,在0~3.5 km范围,两种方法估计的风速完全一致;但在3.5~5 km范围,各距离门平均功率谱扣除先验平滑方法估计的基线后,风速连续性的保持得到了显著改善,表明采用先验平滑基线校正比直接扣除最末背景谱更有助于提高远场距离门的风速估计精度。

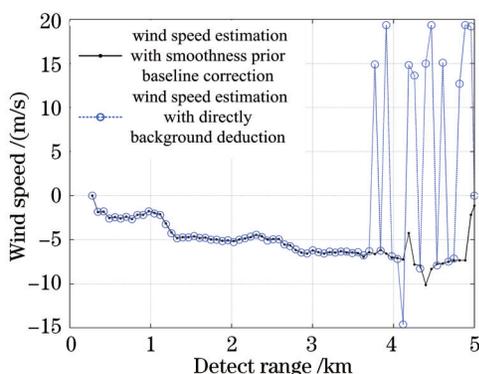


图8 先验平滑扣除背景后的风速估计与直接扣除背景风速估计的结果对比

Fig.8 Wind speed estimation after smoothness prior background deduction compared with that removing last range gate power spectrum

图9显示四个观测时刻的径向风速估计廓线,每个观测时刻都是将400个脉冲的功率谱按对应距离门进行累加平均,并且对每个平均功率谱都作了先验平滑基线校正, λ 取值均为 1×10^9 。另外,还将四条风廓线分别与对应时间的参考风速进行了比较。参考风速是由系统当前采用并验证良好的反演算法计算生成的^[27],将其选作参考标准以检验先验平滑算法的性能。结果显示,在0~3.5 km范围内,四个观测时刻的风速估计均与对应参

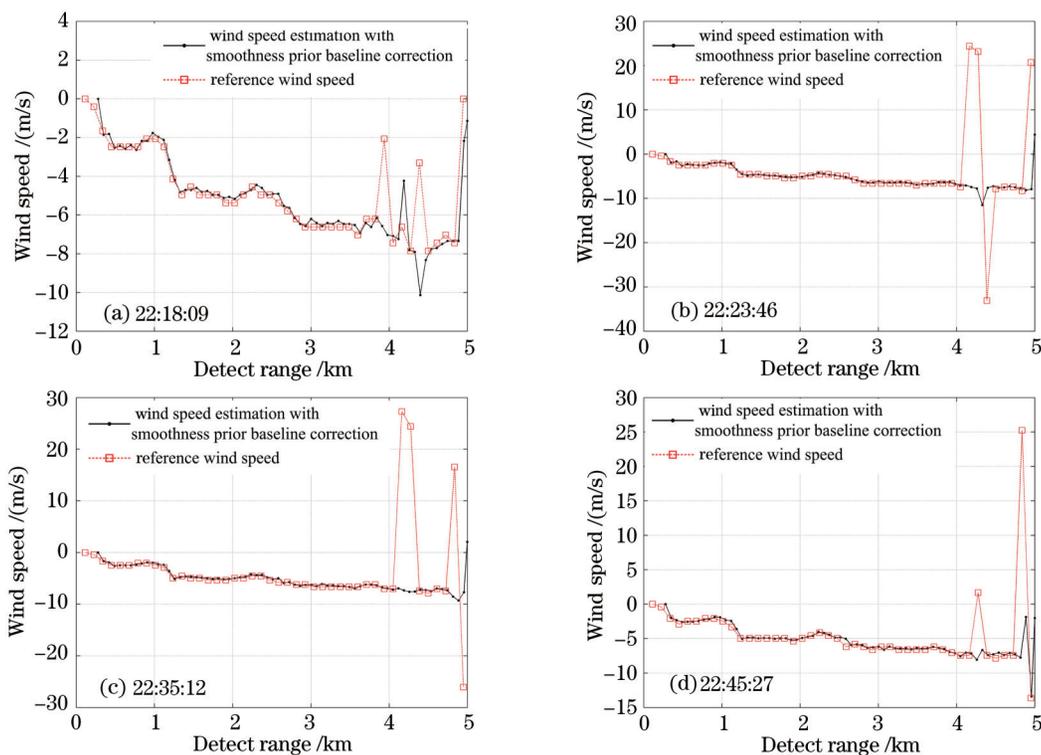


图9 四个观测时刻测量到的径向风速

Fig.9 Radial velocity measured in four observation time

考风速符合得很好;而在 3.5~5 km 的远场范围,观测风速的连续性相对参考风速保持得更好。表明先验平滑基线校正在比较广泛的情况下确实能有效提高远场风速估计精度,从而提升相干测风激光雷达的探测距离。

5 结 论

在周期图法反演风速分布过程中,探测器有色噪声统计平均引起的频谱基线漂移会给多普勒频移估计带来误差。为此提出一种应用先验平滑滤波器进行基线校正的算法,将目标窄频带区域功率谱的权重置零,重构出仅包含基线信息的破缺型数据片段,通过调节正则参数同时估计得到数据片段的拟合基线和破缺区间的插值基线,二者结合便构成了整个功率谱的漂移基线。由于本文算法只需要调节一个参数即可得到所有距离门功率谱的基线估计,相对简便,有利于实际应用。通过将先验平滑基线校正算法应用于实际大气风速测量实验中,并与已存在的直接扣除最末距离门功率谱的方法进行对比,结果发现,先验平滑方法不仅能保证近场风速估计的精度,还更有助于保持远场风速的连续性,提高远场风速的估计精度,从而提升了测风激光雷达的探测距离。

参 考 文 献

- 1 Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, *et al.*. Development of Doppler wind Lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3): 161-168.
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.
- 2 Li Huang, Guo Jinjia. Development of space borne laser Doppler wind radar[C]. *Chinese Meteorological Society 2006 Annual Meeting Proceedings*, 2006: 272-292.
李 黄, 郭金家. 星载激光多普勒测风雷达发展研究[C]. *中国气象学会 2006 年年会论文集*, 2006: 272-292.
- 3 T Itabe, K Mizutani, M Ishizu, *et al.*. ISS/JEM-borne coherent Doppler Lidar program to measure the wind from space[C]. *SPIE*, 2001, 4153: 412-419.
- 4 M J Kavaya, G J Koch, M Petros, *et al.*. Testbed Doppler wind lidar and intercomparison facility at NASA langley research center[C]. *SPIE*, 2005, 5653: 167-174.
- 5 W Baker, G D Emmitt, F Robertson, *et al.*. Lidar-measured winds from space: A key component for weather and climate prediction[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1995, 76(6): 869-888.
- 6 T Itabe, K Mizutani. Coherent Doppler wind lidar for the Japanese experimental module of the ISS[C]. *Optical Remote Sensing*, OSA, 2003: OWA1.
- 7 G J Koch, J Y Beyon, B W Barnes, *et al.*. High-energy 2 μ m Doppler Lidar for wind measurements[J]. *Opt Eng*, 2007, 46(11): 116201.
- 8 U N Singh, M J Kavaya, J Yu, *et al.*. Coherent Doppler Wind Lidar Development at NASA Langley Research Center for NASA Space-Based 3-D Winds Mission[C]. *26th International Laser Radar Conference*, 2012: 25-29.
- 9 R G Frehlich. Performance of maximum likelihood estimators of mean power and Doppler velocity with a priori knowledge of spectral width[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1999, 16(11): 1702-1709.
- 10 J Y Beyon, G J Koch. Novel nonlinear adaptive Dopplershift estimation technique for the coherent Doppler validation Lidar[J]. *Opt Eng*, 2007, 46(1): 016002.
- 11 J Y Beyon, G J Koch, U N Singh, *et al.*. Development of the one-sided nonlinear adaptive Doppler shift estimation techniques[C]. *SPIE*, 2009, 7479: 74790M.
- 12 R G Frehlich, M J Yadlowsky. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and Lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(2): 445-446.
- 13 Cuiyu Zhou, Yuan Liu, Ren Zhu, *et al.*. High-energy nanosecond all-fiber Yb-doped amplifier[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(8): 081403.
- 14 Wang Ran, Gao Chunqing. Progress of 1.6 μ m region single-frequency lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080006.
王 然, 高春清. 1.6 μ m 波段单频激光器技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080006.
- 15 Li Linjun, Zhang Zhiguo, Bai Yunfeng, *et al.*. Progress and prospect on Tm, Ho:YAlO₃ laser at 2 μ m wavelength[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 070003.
李林军, 张治国, 白云峰, 等. 2 μ m 波段 Tm, Ho:YAlO₃ 激光器研究进展及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 070003.
- 16 Sui Xiaolin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, *et al.*. Research on an all-fiber structure velocity measurement coherent Lidar[J]. *Chinese*

- J Lasers, 2013, 40(12): 1208007.
- 眭晓林, 周寿桓, 赵 鸿, 等. 一种全光纤结构的相干激光测速雷达研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208007.
- 17 Weifeng Diao, Xin Zhang, Jiqiao Liu, *et al.*. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(7): 072801.
- 18 Jia Xiaodong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, *et al.*. Optimal design of the telescope in coherent Lidar and detection performance analysis[J]. Acta Optics Sinica, 2015, 35(3): 0301001.
- 贾晓东, 孙东松, 舒志峰, 等. 相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0301001.
- 19 Zhu Xiaopeng, Liu Jiqiao, Diao Weifeng, *et al.*. Study of coherent Doppler Lidar system[J]. Infrared, 2012, 33(2): 8-12.
- 竹孝鹏, 刘继桥, 刁伟峰, 等. 相干多普勒测风激光雷达研究[J]. 红外, 2012, 33(2): 8-12.
- 20 R Frehlich, S M Hannon, S W Henderson. Coherent Doppler Lidar measurements of winds in the weak signal regime[J]. Appl Opt, 1997, 36(15): 3491-3499.
- 21 J Y Beyon, G J Koch, Z Li. Noise normalization and windowing functions for VALIDAR in wind parameter estimation[C]. SPIE, 2006, 6214: 621404.
- 22 E T Whittaker. On a new method of graduation[J]. Proceeding of the Edinburgh Mathematical Society, 1922, 41: 63-75.
- 23 A N Tikhonov, A V Goncharsky, V V Stepanov, *et al.*. Numerical Methods for the Solution of Ill-Posed Problems[M]. New York: Springer, 1995.
- 24 P H C Eilers. A perfect smoother[J]. Anal Chem, 2003, 75(14): 3631~3636.
- 25 P H C Eilers, H F M Boelens. Baseline correction with asymmetric least squares smoothing[J]. Leiden University Medical Centre Report, 2005.
- 26 M P Tarvainen, P O Ranta-aho, P A Karjalainen. An advanced detrending method with application to HRV analysis[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2002, 49(2): 172-175.
- 27 Z Bu, Y Zhang, S Chen, *et al.*. Noise modeling by the trend of each range gate for coherent Doppler Lidar[J]. Opt Eng, 2014, 53(6): 063109.

栏目编辑: 苏 岑