

联合时频分析在相干测风激光雷达中的应用

刘燕平,王冲,吴云斌,上官明佳,夏海云*

(中国科学技术大学 地球与空间科学学院,安徽 合肥 230026)

摘要:相干测风激光雷达具有风场测量精度高、高时空分辨率、探测范围广等突出优点,已广泛应用于风切变探测、飞机尾流探测、风力发电和大气湍流探测等方面。如何从大气回波信号中提取微弱的多普勒频移信息是激光雷达信号处理的难点。基于大气分层模型仿真生成相干激光雷达大气回波信号,对模拟回波信号应用不同的时频分布进行时频分析。随后对比了时频分析的效果,自适应最优核时频分布具有运算量小,交叉项抑制效果好,时频聚集度高等优点。最后,使用 1.5 μm 相干多普勒激光雷达于 2017 年 3 月份在安徽合肥进行实地观测,将自适应最优核时频分布应用于实测数据,与传统的快速傅里叶方法对比风速反演结果。结果表明:自适应最优核时频分布能更好地反映出风速细节信息,3 km 内距离分辨率为 1.2 m,3 km 后经平滑保持了对远场弱信号风速估计的连续性,时间分辨率为 1 s 时其最远水平探测范围约在 6 km。

关键词:时频分析; 相干测风激光雷达; 大气分层模型

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1230001

Application of joint time–frequency analysis in coherent Doppler wind lidar

Liu Yanping, Wang Chong, Wu Yunbin, Shanguan Mingjia, Xia Haiyun*

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: With high accuracy, high spatial–temporal resolution, large scale coverage, coherent Doppler lidar has been widely applied in the detection of wind shear, aircraft vortex, wind power generation, atmosphere turbulence and so on. For lidar signal processing, the key issue is how to extract weak Doppler frequency shift in the weak backscatter signal. Based on the atmospheric slices model, the simulated echo signal of coherent Doppler lidar was processed by different time–frequency methods. Simulation results show that the adaptive optimal–kernel time frequency representation outperforms the others, having the advantages of lower computation cost, suppressing cross terms efficiently and higher resolution in both time and frequency domains. Then the adaptive optimal–kernel time frequency representation was applied to the field experiment data derived from a 1.5 μm Coherent Doppler lidar in Hefei, Anhui Province in March, 2017. The retrieved wind velocity results were compared with that

收稿日期:2018–08–10; 修订日期:2018–09–28

作者简介:刘燕平(1992–),女,硕士生,主要从事激光雷达方面的研究。Email: yanping@mail.ustc.edu.cn

导师简介:夏海云(1979–),男,副教授,博士,主要从事激光雷达技术方面的研究。Email: hsia@ustc.edu.cn

derived from the fast Fourier transform algorithm. Experimental results show that the range resolution is 1.2 meter within 3 kilometers, and maintains the continuity of wind speed retrieved form weak signal using a 50-points window in the far field over 3 kilometers. Furthermore it can track the wind details better and enhance the detection range to 6 kilometers as the temporal resolution is set to 1 second.

Key words: time-frequency analysis; coherent Doppler wind lidar; atmospheric slices model

0 引言

风场作为大气科学的基本参数之一,其精确数据在大气环境与气候学研究、提高数值天气预报准确性、风场风力发电、航空航天与航海事业的气象保障等方面发挥着重要作用^[1-3]。与传统的测风手段相比,测风激光雷达具有高精度、高时空分辨率、监测范围广等突出优点,广泛应用于实时追踪大气湍流、阵风面、风切变、航空器尾流及大气风廓线等领域^[4-8]。其中 NASA 于 2000 年后发射了搭载激光雷达仪器的卫星,冰、云和地面高度卫星(ICESat)、云-气溶胶激光雷达(CloudSat)和红外探路者卫星观测(CALIPSO)为地球空间科学任务提供了大量观测数据。2016 年 8 月由欧洲宇航局研制、世界上第一颗专注于全球大气风场层结探测的 AIADIN 风探测器发射成功。近年来国内夏海云课题组^[9]、陈卫标课题组^[10]、吴松华课题组^[11]、中国航天科技集团公司 508 所激光工程技术研究室、中国电子科技集团公司第二十七研究所等在激光雷达技术领域也取得重大突破。

相干测风激光雷达探测发射激光与大气粒子相互作用后的后向散射信号,利用光外差技术,根据多普勒频移来反演空间的风速分布。激光在大气中传输,受到大气中的悬浮粒子吸收和散射作用,自身的后向散射信号随距离急剧衰减。同时天空背景噪声、地物杂波的散射噪声及光电探测系统中电子元器件内部噪声等干扰掺杂在信号中,导致接收到的回波信号十分微弱,如何从大气回波信号中快速、准确地提取多普勒频移信息是激光雷达信号处理的难点^[12]。目前风速估计方法大多数从独立域描述出发,主要有:脉冲对算法(PP)、多脉冲对方法(PPP)、快速傅里叶变换(FFT)、周期图最大值法(PM)、最大似然算法(ML)等。时域和频域是两个相对独立的信号描述域,功率谱估计方法揭示了信号的频域特征,而联合时频分析能够反映出信号频谱

的时变特性。联合时频从时间-频率域刻画信号全貌,无需对回波信号序列划分距离门^[13],将一维时间分析推广至二维时频空间中描述,得到不同探测距离处的频谱分布进而反演出风速值,直观显示出风速随距离变化情况,便于目标检测和分类。同时,多普勒频率信息通常聚集在有限的时间区间和频率范围内,而随机噪声的能量往往分散在整个时频域范围,淹没在噪声中的信号通过联合时频分析和多组累加的方式更容易识别出来,有效提高了探测距离。

文中首先建立了相干测风激光雷达大气分层模型,仿真生成正弦风速的相干激光雷达大气回波信号,为了比较不同方法的时频分析效果和风速估计精度,选取线性时频分布、双线性时频分布和自适应最优核时频分布对模拟回波信号进行分析。最后使用 1.5 μm 相干多普勒激光雷达于 2017 年 3 月在安徽合肥进行了实地观测^[9],将时频方法应用于晴空大气风速测量实验的实测数据,并将风速反演结果与传统的 FFT 进行比较。

1 相干测风激光雷达时域信号模型

对相干测风激光雷达时域信号的仿真基于 1995 年 Salamiou P 提出的大气分层模型^[14]。大气分层模型沿光学传播轴将可测范围的大气分成厚度为 ΔR 的 M 层,每层中心距离为 z_m。该模型假设:(1)气溶胶粒子均匀分布在每一分层上,同一层下的大气特性认为是相同的;(2)每层粒子运动速度大小和方向相同,粒子径向速度色散相对于平均径向速度可忽略不计;(3)层与层之间的回波信号独立。根据以上假设,m 分层的大气回波信号为:

$$S_m(nT_s) = 2(P_{Lo})^{1/2} \exp(j2\pi\nu_{IF}nT_s) \sum_M \left[P_T \left(nT_s - \frac{z_m}{c} \right) \right]^{1/2} \tilde{\kappa}_m(t) \exp(-j2k\nu_m nT_s) \quad (1)$$

式中:分层厚度 ΔR=cT_s/2;M 为激光脉冲的空间分

布长度内的分层个数; c 为光速; T_s 为采样间隔; v_{IF} 为声光频移量; P_{LO} 为本振光功率; P_T 为发射激光脉冲功率; z_m 为每层中心与接收平面的距离; v_m 为第 m 大气分层处的径向风速; $\tilde{\kappa}_m(t)$ 为随时间变化的粒子运动, 取决于大气状况、光学截断损失和光学混叠等。Salamitou P 定义为圆随机变量, 均方值为:

$$\langle |\tilde{\kappa}_m|^2 \rangle = \exp(-2\delta_m) \beta_m \frac{A}{z_m} \gamma_m \Delta z \quad (2)$$

式中: $\exp(-2\delta_m)$ 为大气透过率函数; γ_m 为相干测风激光雷达系统总效率; A_r 为望远镜有效接收面积; T_m 、 β_m 分别为距离为 z_m 处的大气透过率、后向散射系数。

2 时频表示基本理论分析

2.1 线性时频表示

线性时频表示以短时傅里叶变换和小波分析为主要代表。短时傅里叶变换(STFT)的基本思想是利用一个固定大小的可滑动时间窗将原始信号截断为许多小的时间间隔, 截断的窗内信号近似平稳, 作每段信号的傅里叶变换, 得到各时段的信号频谱, 故又称加窗傅里叶变换。信号 $s(t)$ 的 STFT 定义如下:

$$\text{STFT}(t, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) w^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

式中: $w(t)$ 为窗函数。其时间分辨率与窗函数 $w(t)$ 的时宽成正比, 频率分辨率与窗函数的频宽成正比。根据 Heisenberg 测不准原理, 时间长度上短的窗函数, 在频率域上频宽将被展宽, 频率分辨率下降。因此时间域的高分辨率意味着频率域的低分辨率, 相反的时间域的低分辨率意味着频率域的高分辨率。STFT 采用单一的分析窗, 平移过程中时间域和频率域的窗口宽度始终保持固定, 在整个时频平面得到固定的分辨率。

与 STFT 的固定分辨率相反, 小波变换在一个域得到可变分辨率, 在另一个域得到多分辨率的时频表示方法。信号 $s(t)$ 的连续小波变换定义如下:

$$\text{CWT}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(\tau) \psi^*\left(\frac{\tau - b}{a}\right) d\tau \quad (4)$$

式中: a 称为尺度参数; b 为平移参数; ψ 为母小波。

尺度参数 a 改变时, 小波基的时宽和频宽同时发生改变, 而形状保持不变。与 STFT 使用单一的分析窗不同, 小波变换在低频处使用长窗函数, 在高频处使用短窗函数, 具有可变分辨率, 在多尺度细化分析方面优于 STFT。

2.2 Cohen 类双线性时频分布

对信号 $s(t)$ 的 Wigner-Vile 分布(WVD)定义为信号的瞬时自相关函数的傅里叶变换, 是分析非平稳时变信号最具代表性的二次分布, 又称时频能量分布:

$$\text{WVD}_s(t, w) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{-j\pi w\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\pi w\tau} d\tau \quad (5)$$

WVD 对线性调频信号具有最优分辨率, 同时满足许多理想的数学性质, 如真边缘性、弱支撑性、平移不变性等, 但 WVD 对多分量信号和非线性信号存在着交叉项, 严重影响了信号时变谱的可分辨性和可解释性。围绕着减少和消除交叉项, 研究人员先后提出了类似的时频能量分布形式。1966 年, Cohen 对已有的时频方法研究成果进行总结发现: 大多数的双线性时频分布都可以用 WVD 的二维卷积得到, 核函数可以理解为加在原 WVD 分布上的窗函数, 不同的核函数对应不同的时频分布。Cohen 给出广义双线性时频分布的统一形式, 称之为 Cohen 类, 表达式如下:

$$C(t, w) = \text{WVD}(t, w) k(t, w) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} k(\theta, \tau) s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j(\theta + w\tau - \theta\tau)} d\theta d\tau = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\theta, \tau) \Phi(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\pi w\tau} d\theta d\tau \quad (6)$$

式中: $A(\theta, \tau)$ 为模糊函数。

$$A(\theta, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta t} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{j\theta t} dt \quad (7)$$

式中: $k(\theta, \tau)$ 为核函数, 它决定着时频分布 $C(t, w)$ 的具体种类、形式和性质。表 1 为一些典型的双线性时频分布在模糊平面上的核函数。

表 1 一些双线性时频分布的核函数

Tab.1 Some kernel functions of quadratic TFDs

Item	Kernel function
Wigner-Vile	1
Spectrogram	$\int_{-\infty}^{\infty} w(t+\tau/2)w^*(t-\tau/2)\exp(-j\theta t)dt$
Chio-Williams	$\exp\{-(\theta^2/\sigma)\}$
Page	$\exp(-i\theta\tau)$
Margenau-Hill	$\cos(\theta\tau/2)$
Cone-Shape	$\sin(\zeta\tau/2)\exp(-2\pi a\tau^2)/(\zeta\tau/2)$
Born-Jordan	$\sin(\zeta\tau/2)/(\zeta\tau/2)$

一般情况下，交叉项和自项在模糊域的位置不同，自项位于原点附近，交叉项远离原点。核函数实际上是模糊平面上的低通滤波器，核函数法以牺牲了整个分布的时频分辨率为代价，尽可能保留信号项抑制交叉项。图 1 给出了在模糊平面 Chio-Williams 分布 ($\sigma=1$) 核函数的二维图。图 1 表明 Chio-Williams 分布的指数内核大都沿 θ 轴和 τ 轴分布，如果信号自项紧靠 θ 轴和 τ 轴分布，其时频分析效果良好；当信号自项远离 θ 轴和 τ 轴分布，其自项信号被衰减且保留了 θ 轴和 τ 轴的交叉项，其分析效果不佳。可以看出，传统的固定的核函数只适合分析时频特征变化规律的某一类信号，而很多时候需要根据信号分量特点自适应设计核函数，改善时频分析质量。设计理想核函数成为分析信号时频特性的关键。

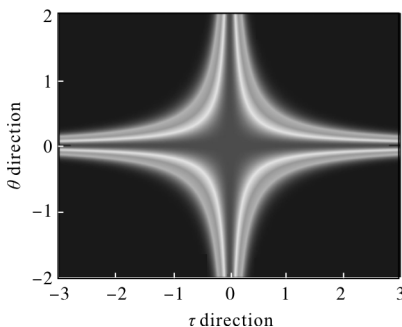


图 1 Chio-Williams 分布的核函数($\sigma=1$)

Fig.1 Kernel function of Chio-Williams distribution($\sigma=1$)

2.3 自适应最优核时频分布

根据信号分量在模糊域的特点，需要设计与信号自适应的核函数以获得更好时频分析效果。交叉

项抑制问题就是要寻找最优核函数，使自项最大程度地被保留，同时使交叉项最大程度地被抑制。自适应最优核时频分布(AOK)^[15]采用短时模糊函数和随时间而自适应改变的核函数，很好抑制了多分量信号中的交叉项。

首先，对模糊函数 $A(\theta, \tau)$ 加上以 t 为时间中心的窗函数，短时模糊函数表达如下：

$$A(t; \theta, \tau) = \int R(u, \tau) w^* \left(u - t - \frac{\tau}{2} \right) w \left(u - t + \frac{\tau}{2} \right) e^{j\theta u} du = \int S^* \left(u - \frac{\tau}{2} \right) s \left(u + \frac{\tau}{2} \right) w^* \left(u - t - \frac{\tau}{2} \right) w \left(u - t + \frac{\tau}{2} \right) e^{j\theta u} du \quad (8)$$

采用在时频域和模糊域都具有较好分辨率的窗函数，在 Weyl-Heisenberg 群中，二维高斯窗能够达到不确定原理的下界。故构造径向高斯型核函数，其任意剖面为高斯型二维函数：

$$\Phi(\theta, \tau) = \exp \left(-\frac{\theta^2 + \tau^2}{2\sigma^2(\psi)} \right) \quad (9)$$

式中： $\psi = \arctan(\tau/\theta)$ 为径向与水平夹角； $\sigma(\psi)$ 为径向高斯型核函数径向角 ψ 方向的扩展。类似地，加窗后短时自适应最优核表达式为：

$$\Phi_{opt}(t; \theta, \tau) = \exp \left(-\frac{\theta^2 + \tau^2}{2\sigma^2(\arctan(\tau/\theta))} \right) w^* \left(u - t - \frac{\tau}{2} \right) w \left(u - t + \frac{\tau}{2} \right) \quad (10)$$

可以看出，高斯函数在极坐标下易于计算，极坐标与直角坐标相互转换大大减少了计算量。求得极坐标下的离散短时模糊函数、离散高斯型核函数、离散最优扩展函数表达式分别如下：

$$A_p(n; b, q) = A(n; r, \psi) |_{r=b\Delta_r, \psi=q\Delta_\psi} = A(n; \theta, \tau) |_{\theta=b\Delta_\theta, \cos q\Delta_\psi, \tau=b\Delta_r, \sin q\Delta_\psi} \quad (11)$$

$$\Phi_p(n; b, q) = \exp \left(-b^2 \Delta_r^2 / 2\sigma_q^2 \right) \quad (12)$$

$$\sigma_q = \sigma(q\Delta_\psi) \quad (13)$$

如何求得最优扩展函数 $\sigma(\psi)$ 为该算法的关键。

核函数的约束条件为：

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty |\Phi(r, \psi)|^2 r dr d\psi = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \sigma^2(\psi) d\psi \leq \alpha \quad (14)$$

式中： $\alpha \geq 0$ 。该约束条件限制核函数的体积 α ，控制模糊域内被保留自项的大小， α 较大时，交叉项不能被很好的抑制， α 较小时，自项被严重的抑制，一般

选取 $0 \leq \alpha \leq 5$ 。采用梯度上升迭代法计算 $\sigma(\psi)$, 设第 i 步迭代得到的扩展向量为 $\sigma(i)$ $\mu(i)$ 为收敛 $\left\| \frac{\partial \sigma(i)}{\partial \sigma(i)} \right\| = \tilde{\sigma}(i)$ 的范数, $\gamma = (4\pi^2 \alpha / \Delta\varphi)^{1/2}$ 为归一化的基准值, $\nabla f(i)$ 为最优核函数的梯度:

$$\tilde{\sigma}(i) = \sigma(i) + \mu(i) \nabla f(i) \quad (15)$$

$$\sigma(i+1) = \tilde{\sigma}(i) \frac{\gamma}{\left\| \tilde{\sigma}(i) \right\|} \quad (16)$$

$$\nabla f(i) = \left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_0(i)}, \dots, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{Q-1}(i)} \right]^T \quad (17)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_q(i)} = \frac{2\Delta_r^2}{\sigma_q^3(i)} \sum_{b=0}^{B-1} b^3 |A_p(n; b, q)|^2 \exp\left(\frac{b^2 \Delta_r^2}{\sigma_q^2(i)}\right) \quad (18)$$

自适应最优核时频分析表达式为:

$$P_{AOK}(t, w) = \frac{1}{4\pi} \iint A(t; \theta, \tau) \Phi_{opt}(t; \theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau w} d\theta d\tau \quad (19)$$

3 基于仿真信号的算法比较分析

考虑实际情况, 选取激光工作波长模拟参数为 1 550 nm, 望远镜作为发射系统和接收系统, 直径为 80 m, 发射激光脉冲半全高宽 300 ns, 本振光功率为 1 mW, 声光频移量为 80 MHz, 采样频率为 500 MHz, 距离门为 60 m, 探测器响应为 1.52 W/A, 系统总效率

为 37.46%。从风的统计规律出发, 按傅里叶分析方法总可以把阵风看成是有多种不同振幅、频率的正弦型风速的叠加。设置模拟输入的风速振幅为 30 m/s, 周期为 100 个距离门。图 2 为输入风速为正弦风速时 0~6 km 范围内随距离变化的模拟回波信号, 激光雷达回波信号为典型的非平稳信号, 呈指数衰减, 随距离的增大, 噪声不断地增大, 接收的能量不断地衰减。

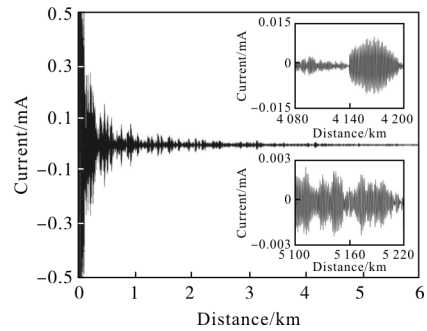


图 2 输入风速为正弦风速的模拟回波信号

Fig.2 Simulated echo signal for the sin wind velocity

时频方法可得到信号的时间-频率分布, 计算出大气的风速-距离图像。设置各时频分布的频率分辨率均为 8 192 点, 谱图分布使用长度为 51 的 hamming 窗, Choi-Williams 的内核分布 $\sigma=1$, 最优化内核表示法 $\sigma=2$, 图 3 显示了 Wigner-Vile 分布、小

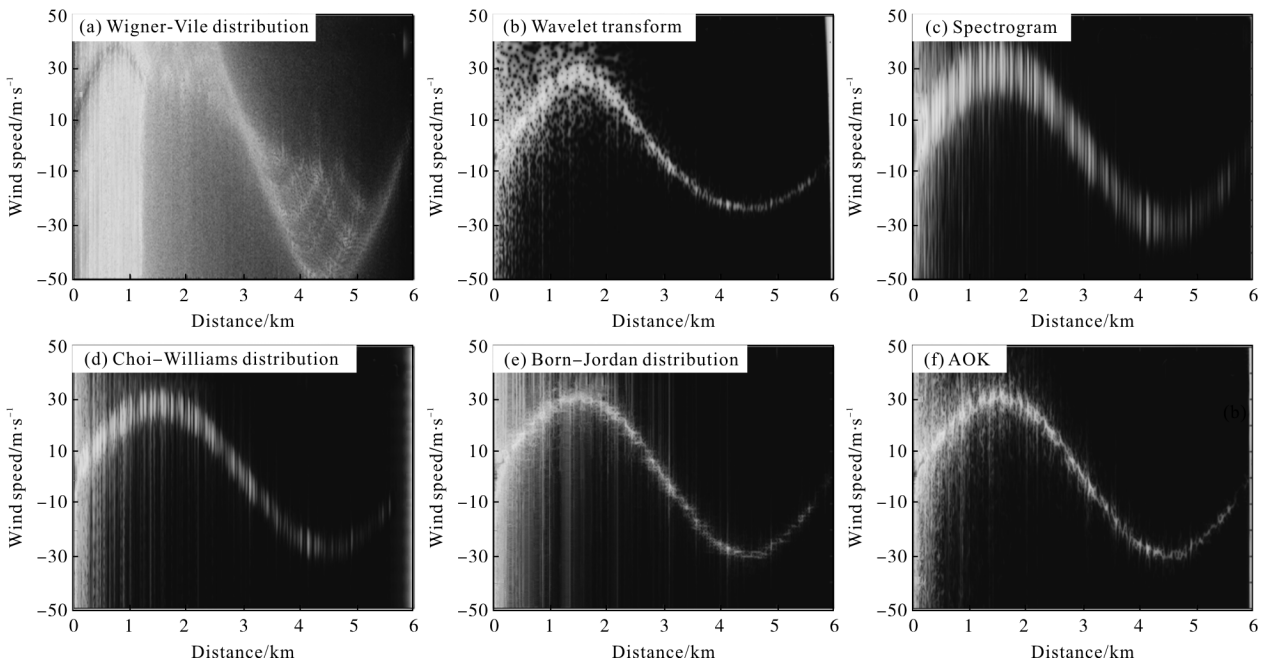


图 3 回波信号的时频分布结果对比图

Fig.3 Comparison of time frequency results for echo signal

波分布、谱图、Choi-Williams 分布、Born-Jordan 分布和最优化内核表示法时频分析的效果对比图。从图 3(a)可以看出 Wigner-Vile 分布具有严重交叉项,存在虚假值误导,造成信号模糊不清。图 3(b)中小波变换能反映出信号的全局轮廓,显示回波信号的非稳定性特征,运算量大。谱图定义为短时傅里叶变换模的平方,同样的,谱图由于加窗存在时间分辨率和频率分辨率的权衡,使用固定窗函数,分辨率单一。图 3(c)谱图的分析结果表明谱图对交叉项有较好的抑制作用,但时频分布的聚集性变差。图 3(d)中的 Choi-Williams 分布和图 3(e)中的 Born-Jordan 分布都具有反映信号全局的能力,Choi-Williams 分布在低信噪比时可读性较差,Born-Jordan 分布大体上获得时间分辨率和频率分辨率的效果好。图 3(f)中自适应最优核分布具有诸多优越性,其运算量小,较好地抑制了时频分布中的交叉项,保持了较高的时频聚集度,清晰地反映出信号局部特征。

4 基于实测数据的算法分析

从消除交叉项的干扰、运算量、时频分辨率等方面综合来讲,AOK 获得更出色的结果,较好地抑制了交叉项,丰富地刻画信号的局部特征。为了验证时频方法分析的效果,将 AOK 应用于晴空大气风速测量实验的数据。2017 年 3 月份 1.5 μm 相干测风激光雷达系统被安置在中国科学技术大学地空学院楼顶,距离海平面 29.8 m,发射激光水平朝北,脉冲能量为 110 μJ ,望远镜口径为 80 mm,采样频率为 250 MHz,频率分辨率为 8 192 点,时间轴上增量为 2 点。从观测时刻 4~6 s 最优化内核表示法时频分布结果如图 4 所示。前 3 km 的时频分布每点距离分辨率为 1.2 m,在约 0~3 km 保持较优的信噪比,风速曲线平滑估计良好,信噪比较低处风速曲线出现抖动起伏。在多次计算得知距离激光源 6 km 后处出现静止硬目标(大楼)散射分布,经大楼散射后回波信号信噪比十分微弱,故后 3 km 采用了 50 个点的平滑窗口以提高信噪比。提取时频矩阵每距离处最大频谱值作为有效风速值,4~6 s 从 150 m~6 km 风速随距离变化细节如图 4 中黑色曲线所示。由于望远镜重叠因子的影响,近距离处接收望远镜存在 150 m 左右的盲区,时频分布从 150 m 左右开始,在可探测范围内风速数

据分布在 -2.35~1.01 m/s 之间。从地图上观察,约 1 km 处沿激光路径两边矗立着两栋大楼形成风道,空气流通狭窄空间时被压缩,风速加大出现局部强风。图 4 中在 1 km 左右出现的风切变正是由于风的聚集形成的,可见 AOK 很好地反映出风速变化的细节。

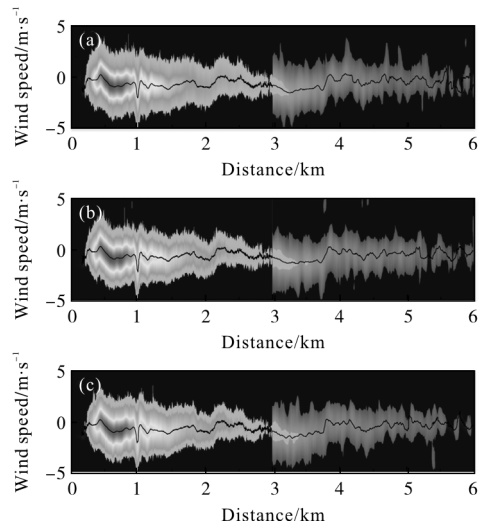
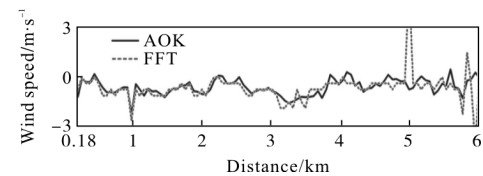


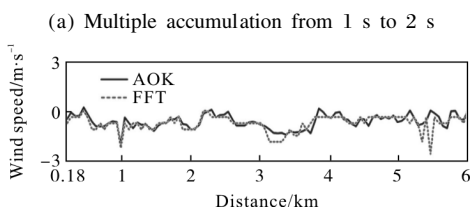
图 4 在 4~6 s 时各回波信号应用自适应最优核时频分布结果图和风速变化细节图

Fig.4 Results of echo signal by adaptive optimal-kernel time-frequency representation and the wind details from 4 s to 6 s

FFT 在选取距离门为 60 m、时间分辨率 2 s (31 250 次累加)发射激光脉冲累加条件下,对每距离门采用高斯线性拟合反演风速。AOK 时间分辨率为 2 s(31 250 次累加),每隔 60 m 取风速点,两者从 1~6 s 风速结果对比如图 5(a)~(c)所示。在 3.3 km 的探测范围内,AOK 和 FFT 都具有较好的稳定性,两者

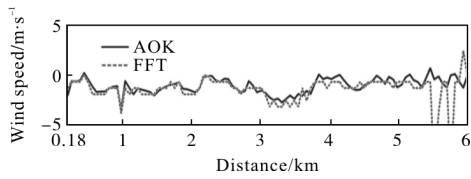


(a) 1~2 s 数据累加



(b) 3~4 s 数据累加

(b) Multiple accumulation from 3 s to 4 s



(c) 5~6 s 数据累加

(c) Multiple accumulation from 5 s to 6 s

图 5 AOK 与 FFT 反演风速结果比较图

Fig.5 Comparisons of wind velocity results inverted by adaptive optimal-kernel time-frequency representation and the fast Fourier transform algorithm

风速评估曲线基本吻合。后续距离内 AOK 和 FFT 存在一定偏差, AOK 在之后的距离仍然保持较为连续的风速趋势, 而 FFT 会出现陡峭起伏的奇点, 两者总体走势基本一致。图 6 为每 2 s 各风速变化差值对比, AOK 的风速估计差值随着信噪比降低而增大, 总体上 FFT 跳变相对更大且存在异常值, AOK 对远场弱信号的算法风反演的稳定性优于 FFT。结果表明, AOK 不仅对近场风速估计效果良好, 更保持了对远场风速估计的连续性, 可以有效提升测风激光雷达的距离分辨率和探测距离, 很好反映出风速细节。

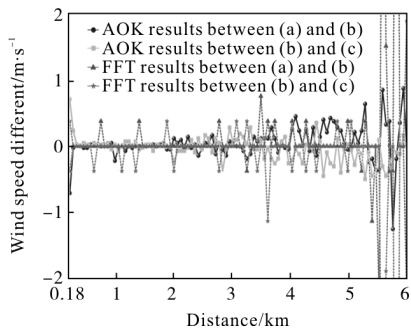


图 6 每 2 s 各风速变化差值对比

Fig.6 Variation of 2-second wind-speed differences for the observation time

5 结论

文中基于多普勒测风激光雷达时域信号大气分层模型, 模拟生成了正弦风速下的大气回波信号。探讨了线性时频分布、双线性时频分布和自适应最优核时频分布的理论。对模拟回波信号应用不同的时频方法, 结果表明文中的时频方法较好地抑制了魏格纳分布中的交叉项, 大致都能反映出信号的全局

轮廓。综合考虑运算量、交叉项的干扰、时频分辨率等因素, 自适应最优核时频分布获得更出色的结果, 丰富地刻画出信号的局部特征, 时频聚集度高, 交叉项抑制效果好。

应用自适应最优核时频分布于实测数据, 将反演风速结果与 FFT 相比, 结果表明自适应最优核时频分布不仅对近场风速估计效果良好, 提高了距离分辨率, 保持了对远场弱信号风速估计的连续性, 更好反映出风速变化的细节。时频分析在激光雷达信号弱信号的检测、估计、识别、分类、特征提取、信号分离、信号综合、滤波以及干扰、噪声的抑制等具有广泛的研究前景。

参考文献:

- [1] Shangguan M, Xia H, Wang C, et al. All-fiber upconversion high spectral resolution wind lidar using a Fabry-Perot interferometer [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19322-19336.
- [2] Yang F, He Y, Shang J, et al. Development of an all-fiber heterodyne lidar for range and velocity measurements [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(7): 713-716.
- [3] Liu J, Zhu X, Diao W, et al. All-fiber airborne coherent Doppler lidar to measure wind profiles [C]//EPJ Web of Conferences, EDP Sciences, 2016, 119: 10002.
- [4] Shi Chenglong, Liu Jiqiao, Bi Decang, et al. Errors analysis of dioxide carbon concentrations measurement by airborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (5): 0530001. (in Chinese)
史成龙, 刘继桥, 毕德仓, 等. 机载激光雷达测量二氧化碳浓度误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0530001.
- [5] Lu Xianyang, Li Xuebin, Qin Wubin, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micropulse lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1697-1704. (in Chinese)
鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1697-1704.
- [6] Liu Zhiqing, Li Pengcheng, Chen Xiwei, et al. Classification of airborne Lidar point cloud data based on information vector machine [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 210-219. (in Chinese)
刘志青, 李鹏程, 陈小卫, 等. 基于信息向量机的机载激光雷达点云数据分类[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 210-219.
- [7] Qu Yi. Technical status and development tendency of

- atmosphere optical remote and monitoring [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 834–840. (in Chinese)
- 曲艺. 大气光学遥感监测技术现状与发展趋势[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 834–840.
- [8] Li Li, Wang Canzhao, Xie Yafeng, et al. Wind field inversion technique for scanning wind lidar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 251–258. (in Chinese)
- 李丽, 王灿召, 谢亚峰, 等. 扫描式测风激光雷达的风场反演[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 251–258.
- [9] Wang C, Xia H, Shangguan M, et al. 1.5 μm polarization coherent lidar incorporating time–division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20663–20674.
- [10] Liu J, Zhu X, Diao W, et al. All–fiber airborne coherent doppler lidar to measure wind profiles [C]//EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2016, 119: 10002.
- [11] Zhai X, Wu S, Liu B. Doppler lidar investigation of wind turbine wake characteristics and atmospheric turbulence under different surface roughness[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): A515–A529.
- [12] Deng Pan, Zhang Tianshu, Chen Wei, et al. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S13003. (in Chinese)
- 邓潘, 张天舒, 陈卫, 等. 大气探测激光雷达噪声比例因子及信噪比的估算 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S13003.
- [13] Bai Xue, Guo Pan, Chen Siying, et al. Simulation in the time domain and time–frequency analysis for coherent doppler wind Lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0114003.
- 白雪, 郭磐, 陈思颖, 等. 相干多普勒测风激光雷达时域信号仿真及时频分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114003.
- [14] Salamitou P, Dabas A, Flamant P H. Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(3): 499–506.
- [15] Baraniuk R G, Jones D L, Baraniuk R G, et al. A signal–dependent time–frequency representation: Optimal kernel design [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(4): 1589–1602.