

相干多普勒测风激光雷达时域信号仿真及时频分析

白雪 郭磐 陈思颖 张寅超 陈和 步志超

北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 基于大气分层时域信号生成模型(feuilleté model)进行非平稳信号的仿真。引入时-频域联合分析方法反演风速,对非平稳风速模型下的仿真回波信号进行算法处理研究。基于实际系统参数,分别在线性剪切风速和美国宇航局(NASA)阵风模型下仿真回波信号。对仿真信号作 Wigner-Ville 变换,通过分析信号时频变换后的能量峰值在时频面内的分布来反演风速。采用多组脉冲累加平均的方式来减少因散斑噪声、交叉项等因素造成的反演风速的波动。结果表明,利用时-频域联合分析方法可以快速反演出风速信息,无需对探测范围进行距离门的划分;对多组信号的时频变换结果做累加平均处理后,反演风速的波动减小,与输入风速的一致性得到了明显的改善。

关键词 遥感; 相干多普勒测风激光雷达; 风速反演; 时频分析; 时域信号仿真

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0114003

Simulation in the Time Domain and Time-Frequency Analysis for Coherent Doppler Wind Lidar

Bai Xue Guo Pan Chen Siying Zhang Yinchao Chen He Bu Zhichao

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract An atmospheric slices time domain signal generation algorithm model (feuilleté model) is proposed to simulate the signal under non-stationary atmospheric conditions. The wind inversion by means of time-frequency analysis is introduced, and the algorithm processing of signals simulated under non-stationary wind model is studied. Based on the actual system parameters, the echo signals are simulated under conditions of linear wind shear and national aeronautic and space administration (NASA) typical wind shear model, respectively. Wind inversion by analyzing the distribution of peak energy in the time-frequency domain after the application of Wigner-Ville transformation on the simulated signal is got. And in this process, the fluctuation of wind inversion, which results from speckle noise, cross terms and other factors, can be reduced by accumulating multiple time-frequency transforms of pulses. The results show that, wind inversion is obtained quickly and directly by utilizing time-frequency analysis methods and without division of range gate in detection zone. The fluctuation of wind inversion decreases after the processing of accumulation and average, and the similarity between wind inversion and input wind speed is improved significantly.

Key words remote sensing; coherent Doppler wind lidar; wind inversion; time-frequency analysis; time domain signal simulation

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 010.0280; 070.1170; 280.3340

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2014-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61178072)

作者简介: 白雪(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达大气风场测量方面的研究。E-mail: baixue621@126.com

导师简介: 郭磐(1981—),男,博士,讲师,主要从事激光雷达信号获取与处理算法方面的研究。

E-mail: guopan@bit.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

大气风场的精确测量对气象系统动力学模型研究、数值天气预报的改进、军事环境的精确性预报等都有重大意义,可用于监测机场风切变、监视飞行路线前方的风场情况,为航空航天提供重要的安全保障^[1]。目前已有多种大气风场的测量方法,如无线电探空系统、微波雷达等^[2]。多普勒测风激光雷达,相对于微波雷达来说波长较短,大气的后向散射较强,适合用于晴空探测,美国、日本和欧洲各国都对其都投入了大量的研究。

相干测风激光雷达系统采用相干接收体制^[3],系统复杂、设备要求高、成本昂贵,利用计算机仿真是一种可行的研究方法。本文基于大气分层模型(feuilleté model)^[4],考虑激光束的传播及其与大气的相互作用,探测体内的风速细节,结合实际的系统参数,对相干多普勒测风激光雷达在非平稳大气情况下的回波信号进行时域仿真,得到时变信号用于后续的数据处理与验证。

利用数据处理算法对仿真的回波信号进行验证、分析和风速反演。目前应用于相干测风激光雷达的数据处理算法主要有:快速傅里叶变换(FFT)^[5]、克拉默-拉奥下界算法(CRLB)^[6]、脉冲对算法^[7]、多脉冲对算法(poly-pulse pair)和最大似然算法(ML)^[8]等。其中快速傅里叶变换是数据处理中最常用的算法。它对每个距离门内的信号序列作傅里叶变换及功率谱估计。与快速傅里叶方法相比较,时-频域联合分析方法可以直接对多个距离门进行连续处理,将一维的时间信号以二维的时间-频率密度函数形式表示出来,快速得到不同探测距离处的频谱数值进而反演出风速值。本文分别在理想的线性剪切风速模型和美国宇航局(NASA)阵风模型下,进行回波信号的仿真及可靠性验证;基于Wigner-Ville变换对仿真回波信号进行了风速反演的分析和验证。

2 目标回波的时域模型及时变特性分析

2.1 大气分层模型

相干多普勒测风激光雷达基于光外差探测原理^[9],通过接收大气中气溶胶粒子的后向散射光,以获得足够强的多普勒测风信息。每一时刻激光束作用体积内的气溶胶粒子尺度分布极广,随机性很强^[10],数量可达到 10^7 数量级。因此回波信号的强度和相位都存在很强的随机性,由单个粒子的散射计算回波信号是非常困难的。

基于端到端的大气分层模型对非稳定大气条件下的相干多普勒测风激光雷达的回波信号进行时域仿真。大气分层模型将探测范围内的气溶胶散射体沿光束传播轴分为 M 层,每一层的厚度为 ΔR ,并假设每一层内的气溶胶粒子运动速度大小和方向相同、散射系数恒定(如图1所示)。通过全部分层回波信号的叠加得到总的回波信号。层数 M 的取值一般为几百到上千,与 10^7 相比大大减小了计算量。

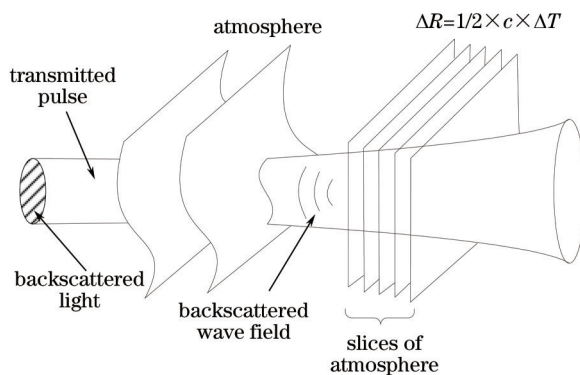


图1 大气分层模型原理示意图

Fig.1 Schematic of atmospheric slices time domain signal generation algorithm model

如图1所示,分层厚度 $\Delta R = 1/2 \times c \times \Delta T$,其中 c 为光速, ΔT 为采样时间。层数 $M = c \times P_T / (2\Delta R)$, P_T 是发射激光脉冲宽度。

假设层与层之间的回波信号相互独立,将每一层的回波信号进行非相干累加,可得到总的回波信号为 $S(t)$,其可表示为

$$S(t) = 2(P_{L0})^{1/2} \exp(i2\pi v_{if} t) \sum_m \left[P_T \left(t - \frac{2R_m}{c} \right) \right]^{1/2} \times \exp \left[i\varphi \left(t - \frac{2R_m}{c} \right) \right] \tilde{K}_m \exp(-i2kv_m t), \quad (1)$$

式中 $P_{L0}(W)$ 是本振光功率, P_T 是发射的激光脉冲, v_{if} 是声光频移量, R_m 是每层中心与接收平面间的距离, φ 是相位函数, k 是波数, v_m 是沿光束传播轴的径向风速。

\tilde{K}_m 是一个圆随机变量^[11], 由大气参数组成, 其可表示为

$$\langle |\tilde{K}_m| \rangle = \exp(-2\delta_m) \beta_m \frac{A}{R_m^2} \gamma_m \Delta R, \quad (2)$$

式中 A 是接收望远镜的面积; R_m 是每层中心与接收平面间的距离; β_m 是后向散射系数随距离的分布, 单位为 $m^{-1} \cdot sr^{-1}$; γ_m 是系统效率; $\exp(-2\delta_m)$ 是透射率。

在探测范围内, 按仿真所需的风速细节设定 v_m 的取值情况, 将系统参数代入(1)式就可得到仿真的回波信号随时间或距离的变化关系。

2.2 信号时变特性分析

随机信号在理论上可以分为平稳和非平稳两大类。非平稳信号是指统计特性随时间变化的随机信号, 其概率密度 $P(t, x)$ 是时间的函数^[12]。在探测时间内, 由(1)式仿真得到的回波信号具有明显的时变特征, 是非平稳信号。通过利用时间 t 的 Q 阶多项式来近似单次观测期间目标运动的径向速度, 可以分析回波信号的时变特性。假设径向速度的表达式为

$$v_m = \sum_{q=0}^Q a_q t^q, \quad (3)$$

式中 a_q 是多项式系数。根据(1)式建立的回波信号数学模型, 单层回波信号可表示为

$$S_m(t) = G(t) k_m(t) \exp \left(-i \frac{4\pi}{\lambda} v_m t \right) = G(t) k_m(t) \exp(i2\pi f_0 t) \exp \left[-i \frac{4\pi}{\lambda} (R_m - v_m t) \right], \quad (4)$$

式中 f_0 为发射频率, λ 为波长, $G(t)$ 和 $k_m(t)$ 代表模型系数。去掉载波信号及固定相位可得

$$s_m(t) = \exp \left[i \frac{4\pi}{\lambda} \left(\sum_{q=0}^Q a_q t^q \right) t \right]. \quad (5)$$

假设目标运动的径向速度为线性, 即 $v_m = a_0 + a_1 t$, 得到具有二次相位变化的回波信号为

$$s_m(t) = \exp \left[i \frac{4\pi}{\lambda} (a_0 + a_1 t) t \right], \quad (6)$$

即在探测时间内(6)式表示的回波信号可看作是啁啾信号, 其具有明显的时变特征, 是非平稳信号。

傅里叶变换建立了信号从时域到频域的一一对应的映射关系, 即

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i2\pi f t) dt, \quad (7)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(i2\pi f t) df. \quad (8)$$

傅里叶变换将一个函数表示成无穷多个最和谐的函数—正弦函数的加权和, 对信号的表征要么完全在时域, 要么完全在频域, 不能揭示某种频率分量出现在什么时候以及随时间的变化情况。因此, 常用的快速傅里叶变换方法适于分析信号组成分量的频率不随时间变化的平稳信号。

由以上分析, 多普勒回波信号属于非平稳信号的分析领域。为了克服傅里叶变换的局限性, 引入时-频域联合分析方法。时频分析方法通过分析时间、频率及能量之间的密切关系, 提取信号中所包含的特征信息, 以揭示信号中所包含的频率分量及其演化特性^[13]。时频分析能够确定特定时间有哪些频率成分存在, 因而在非平稳信号的分析领域得到广泛应用。

Wigner-Ville 分布是常用的时频分析方法, 在已提出的各种时频分布中, 形式简洁并且具有很好的性质。Wigner-Ville 分布具有明确的物理意义, 可被看作信号能量在时域和频域中的分布。Wigner 在研究量子力学时提出的这种分布可表示为^[14]

$$S_{WVD}(t, f) = \int s \left(t + \frac{\tau}{2} \right) s^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \exp(-i2\pi f \tau) d\tau. \quad (9)$$

由于Wigner-Ville分布不是线性的,应用于大气分层模型时域仿真回波信号时会有交叉项产生,一般可通过加入核函数来抑制^[12,15],如平滑伪Wigner-Ville分布。

3 回波信号仿真分析

首先对最简单的风速分布情况(常风速)进行分析,常风速是一种特殊的线性风速情况,在探测范围内各层的风速 v_m 为恒定值 2 m/s。根据表 1 所列系统参数,对于发射激光能量 E_s 为 100 mJ,发射激光 P_T 脉冲宽度为 400 ns,探测器带宽 B_n 为 200 MHz,系统的采样频率为 500 MHz 的系统,计算可得距离分辨率为 60 m,层数 M 为 200 层,分层厚度 $\Delta R=0.3$ m。利用(1)式仿真得到探测距离在 60~6000 m 内的回波信号随距离的变化曲线,如图 2 所示。利用单个脉冲的回波信号来反演风速常因散斑效应中的随机相位的影响而产生偏差。为了消除这种影响,可以先对多组脉冲进行累加平均再进行风速评估。

表 1 相干测风激光雷达系统仿真参数

Table 1 System parameters used for simulation of coherent wind lidar

Parameter	$\lambda / \mu\text{m}$	γ_m	P_T / ns	$\beta_m / (\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$	E_s / mJ	δ_m	P_{l0} / mW	v_{IF} / MHz	A / mm	B_n / MHz
Value	2	0.12	400	8×10^{-8}	100	0.8	1	55	1100	200

对相干测风激光雷达时域仿真回波信号进行功率谱评估,得到以距离门为空间分辨率的一维风速信息。选取第一个距离门 60~120 m 为研究对象,由快速傅里叶变换原理的风速反演算法^[16],得到第一个距离门内回波信号的功率谱变换曲线,如图 3 所示。

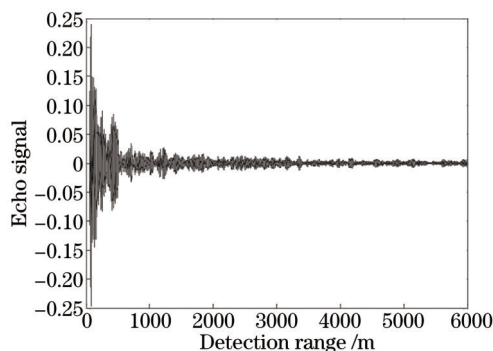


图 2 常风速时单个发射脉冲的回波信号

Fig.2 Curve of echo signal simulated with one pulse for the constant wind velocity

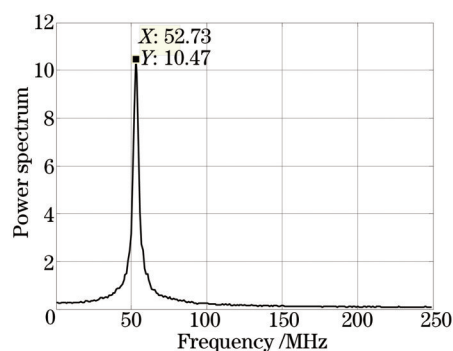


图 3 常风速时第一个距离门内回波信号的功率谱

Fig.3 Power spectrum of echo signal in first range gate for constant wind velocity

功率谱峰值对应的频率(52.73 MHz)与声光频移量 v_{IF} (55 MHz)的差值为多普勒频移,即给定风速造成的多普勒频移应为 2.27 MHz。由多普勒测风原理可以反演得到径向风速为 2.27 m/s。由于快速傅里叶变换算法的自身精度,反演风速与给定的风速大小间有 0.27 m/s 的偏差。风速反演的误差较小,说明利用大气分层模型对回波信号进行时域仿真的方法是可行的。

4 应用时频变换反演风速

4.1 理想线性剪切风速的信号仿真与分析

通过描述风速细节,可将大气分层模型应用于非平稳的大气环境。下面对 v_m 为理想线性剪切风速时的回波信号进行仿真和验证,系统参数如表 1 所示。假定相干测风激光雷达在 60~1200 m 距离内进行探测,忽略大气湍流的影响,风速从 0 线性增加到 50 m/s,如图 4 所示。将此线性变化的风速代入到大气分层模型的回波信号中,得到回波信号随着探测距离的变化曲线,如图 5 所示。

对比图 2 与图 5 可以看到,两图中回波信号都由于散斑的低频调制作用出现了随机起伏,变化趋势基本相同。但 v_m 为线性剪切风速时,剪切风速随距离逐渐增大(见图 4),由多普勒效应可知多普勒频移量也随距离逐渐增大。由于声光频移量 v_{IF} 为固定值 55 MHz,因而信号的调制频率从近地面向探测远端逐渐降低,且

可以明显看到信号的频率衰减变化规律(如图5所示)。

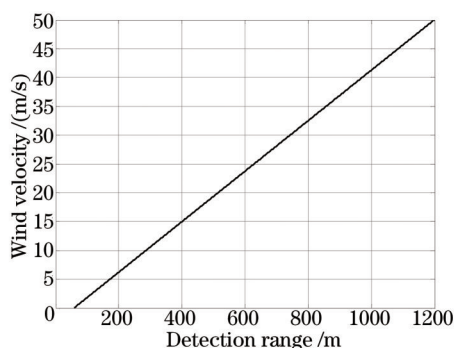


图4 理想的线性剪切风速
Fig.4 Ideal linear wind shear

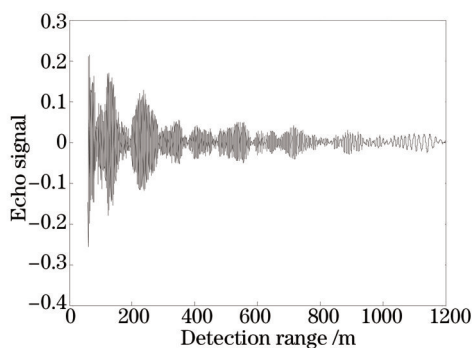


图5 线性风速时单个发射脉冲的回波信号
Fig.5 Curve of echo signal simulated with one pulse for linear wind shear

基于 Wigner-Ville 时频变换对仿真得到的回波信号进行定量分析,得到频率随时间的变化关系,进而反演出风速值,并与输入的风速值进行比较。系统预置的声光调制频移 ν_{IF} 为 55 MHz,加入上述线性风速后,由相干探测原理及多普勒频移原理可知,回波信号经变换后对应的频率范围应为 5~55 MHz,呈线性变化趋势。线性风速下单脉冲回波信号的 Wigner-Ville 时频分布等高线图如图6所示,可以看到信号的频率随时间的增加呈线性递减趋势,符合预期。由于 Wigner-Ville 时频变换的交叉干扰项的存在,图6中信号能量在时频面内的分布聚集性不佳,可采用多个脉冲累加的方式来对其进行改善。

Wigner-Ville 时频分布可被看作信号能量在时域和频域中的分布。由每个时间点对应的信号能量的峰值及该能量峰值对应的频率坐标,即信号能量的峰值在时频面上的分布,就可得到一个频率随时间变化的关系,由多普勒测风原理可以反演得到每个时间点对应的风速值。反演得到的风速与线性剪切风速的对比如图7所示。

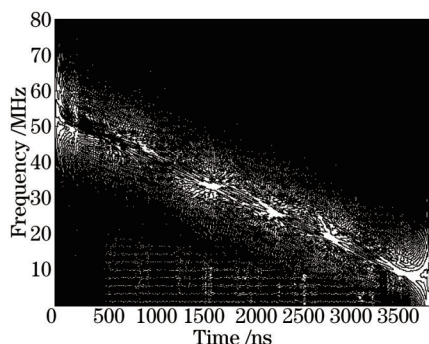


图6 线性风速时单个脉冲的回波信号的 Wigner-Ville 时频分布(等高线图)

Fig.6 Wigner-Ville time-frequency distribution of echo signal simulated with one pulse for linear wind shear (contour map)

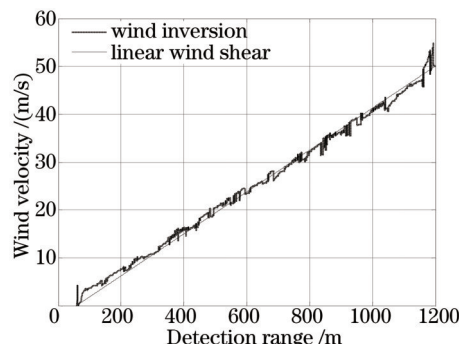


图7 单脉冲回波信号的反演风速与理想的线性剪切风速对比

Fig.7 Wind velocity of echo signal simulated with one pulse compared with ideal linear wind shear

从图7中可以看到,反演风速在整体上与输入的线性剪切风速有较好的一致性。但是由于系统接收到的大气回波信号非常微弱,加上散斑噪声等因素的影响,反演风速出现了不同程度的波动。因此,采用多个脉冲累加的方式来减少波动,对60组脉冲信号分别作时频变换后累加平均进而反演风速值。图8为60组发射脉冲仿真得到的回波信号作 Wigner-Ville 变换后累加平均的时频分布。从图8中可以看到,信号能量在时频面上的分布的聚集性得到了明显改善,线性趋势更明显,频率分布更平滑,趋近于线性。噪声对信号及反演风速的影响减小,反演风速的波动得到了明显的改善,如图9所示。分别用单个脉冲和60组脉冲回波信号来反演风速,两次反演风速间的误差随探测距离的变化曲线如图10所示。

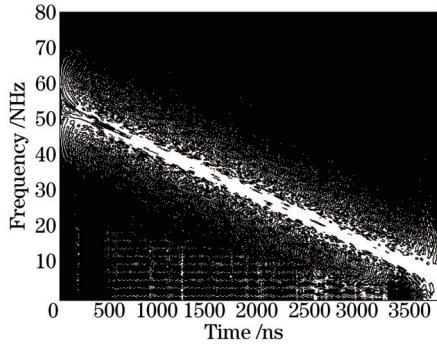


图8 线性风速时60个脉冲的回波信号的Wigner-Ville时频分布(等高线图)

Fig.8 Wigner-Ville time-frequency distribution of echo signal simulated with 60 pulses for linear wind shear (contour map)

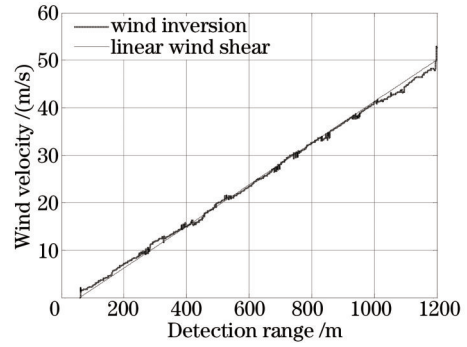


图9 发射60个脉冲回波信号的反演风速与理想的线性剪切风速对比

Fig.9 Wind velocity of echo signal simulated with 60 pulses compared with ideal linear wind shear

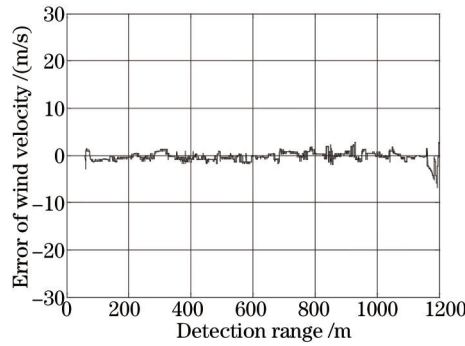


图10 线性风速时分别由单脉冲和60组脉冲回波信号反演风速的误差

Fig.10 Wind velocity's errors between one pulse and 60 pulses for linear wind shear

4.2 NASA阵风模型的信号仿真与分析

对基于实际观测值的大气风场进行仿真和验证。利用(10)式计算得到NASA的典型阵风模型^[17-18](见图11),为了方便对比设风速最大值 V_{\max} 为 50 m/s, H_{ref} 为参考高度位置, h 为变化的气层厚度, d_m 为阵风层的半厚度。

$$V = \begin{cases} \frac{V_{\max}}{2} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi}{2h} (y - H_{\text{ref}}) \right] \right\}, & H_{\text{ref}} \leq y < H_{\text{ref}} + h \\ V_{\max}, & H_{\text{ref}} + h \leq y < H_{\text{ref}} + 2d_m - h \\ \frac{V_{\max}}{2} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi}{2h} (y - H_{\text{ref}} - 2d_m) \right] \right\}, & H_{\text{ref}} + 2d_m - h \leq y < H_{\text{ref}} + 2d_m \end{cases} \quad (10)$$

将阵风模型代入到大气分层模型的回波信号中进行定量分析。图12为阵风模型下单个发射脉冲的回

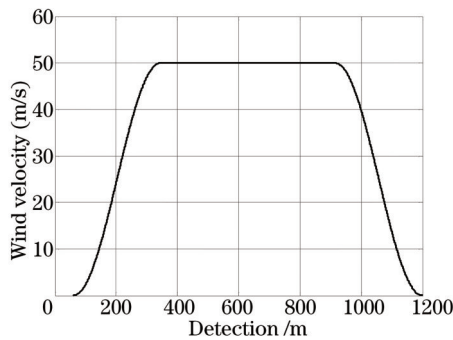


图11 NASA的典型阵风模型
Fig.11 NASA typical wind shear model

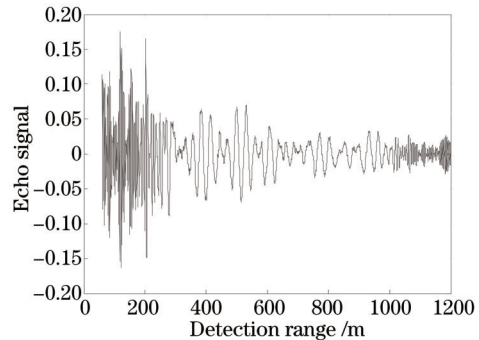


图12 阵风模型下单个发射脉冲的回波信号
Fig.12 Curve of echo signal simulated with one pulse for NASA typical wind shear model

波信号随距离的变化曲线。与图2中的常风速下回波信号曲线进行对比可以看出,两图中回波信号的变化趋势基本相同。但图12中,由于 v_m 的取值随距离变化,相应的多普勒频移量也随距离变化且与 v_m 的变化趋势相同。声光频移量 v_{if} 为固定值55 MHz,因而信号的调制频率从近地面向探测远端是一个先减小、中间一段保持不变然后增大的过程。

基于Wigner-Ville时频变换对仿真的阵风模型下的单脉冲回波信号进行定量分析,其Wigner-Ville时频分布等高线图如图13所示。频率随时间的变化趋势符合相干探测原理及多普勒频移原理。由于交叉干扰项的存在,信号能量在时频面内的分布聚集性较差。提取信号能量峰值对应的时频分布,反演出风速后与输入的阵风模型做比较,其结果如图14所示。

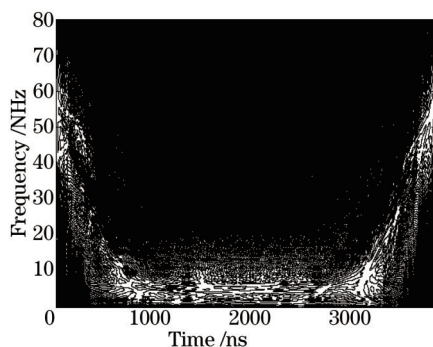


图13 阵风模型下单个脉冲的回波信号的Wigner-Ville时频分布(等高线图)

Fig.13 Wigner-Ville time-frequency distribution of echo signal simulated with one pulse for NASA typical wind shear model (contour map)

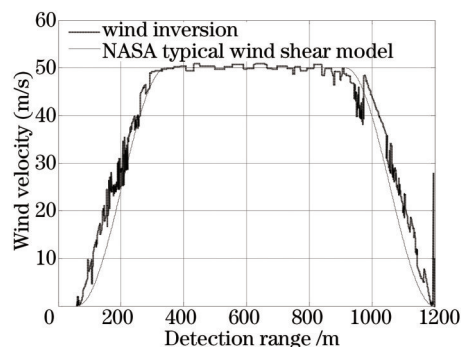


图14 单脉冲回波信号的反演风速与典型的阵风模型对比

Fig.14 Wind velocity of echo signal simulated with one pulse compared with NASA typical wind shear model

与 v_m 为线性风速时的情况相似,散斑噪声、交叉项等因素的影响使反演风速出现了不同程度的波动,反演风速与阵风模型的一致性不佳。对60组回波信号分别作时频变换后累加平均进而反演风速值。从图15中可以看到信号能量在时频面上的分布的聚集性得到了明显改善,频率分布更平滑。噪声对信号及反演风速的影响减小,反演风速与阵风模型的一致性得到了明显的改善(见图16)。分别用单个脉冲和60组脉冲回波信号来反演风速,二者间的误差随探测距离的变化曲线如图17所示。

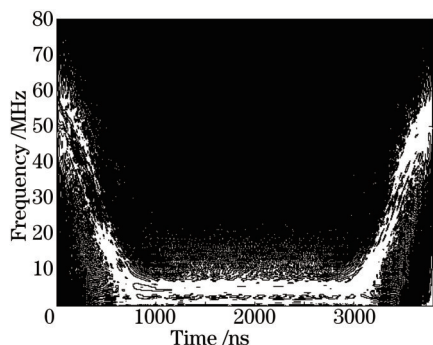


图15 阵风模型下60个脉冲的回波信号的Wigner-Ville时频分布(等高线图)

Fig.15 Wigner-Ville time-frequency distribution of echo signal simulated with 60 pulses for NASA typical wind shear model (contour map)

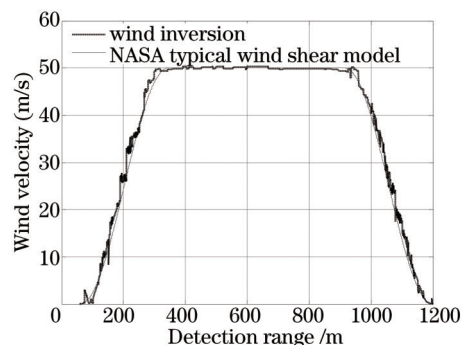


图16 60个脉冲回波信号的反演风速与阵风模型对比

Fig.16 Wind velocity of echo signal simulated with 60 pulses compared with NASA typical wind shear model

5 结 论

基于大气分层模型对相干多普勒测风激光雷达的回波信号进行时域仿真,基于Wigner-Ville时频变换方法对仿真信号进行分析。Wigner-Ville时频分布可看作是信号能量在时域和频域中的分布。由每个时间

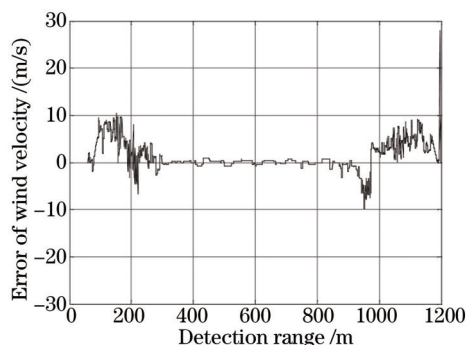


图 17 阵风模型下分别由单脉冲和 60 组脉冲回波信号反演风速的误差

Fig.17 Wind velocity's errors between one pulse and 60 pulses for NASA typical wind shear model

点对应的信号能量的峰值及该能量峰值对应的频率坐标,即信号能量的峰值在时频面上的分布,就可得到一个频率随时间变化的关系,由多普勒测风原理可以反演得到每个时间点对应的风速值。大气情况分别为线性风速和阵风模型时,仿真信号及反演风速经过验证有较为理想的结果。

与传统的快速傅里叶方法相比,时频分析方法在处理非平稳信号时有着明显的优势。快速傅里叶方法对每个距离门内的信号序列作傅里叶变换及功率谱估计,全部数据算法流程包括距离门划分、功率谱估计、累加去噪、频谱矫正等过程。而时频分析方法可以直接对多个距离门进行连续处理,快速得到不同探测时间的频谱数值进而反演出相应的风速值。

由于散斑噪声、Wigner-Ville 时频变换交叉项等因素的影响,经时频变换反演得到的风速出现了不同程度的波动,可以采取多个脉冲累加平均的方式来改善。通过比较单个脉冲回波信号和 60 个脉冲回波信号在不同大气条件下反演风速的效果,可以看到经过累加平均处理的信号,其能量在时频面上的分布聚集性得到了明显改善;反演风速的波动减小,反演风速与输入风速的一致性得到了明显的改善。

参考文献

- 1 Fujii Takashi. Laser Remote Sensing[M]. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2005.
- 2 Li Huang, Guo Jinjia. Development of space borne laser Doppler wind radar[C]. Chinese Meteorological Society 2006 Annual Meeting Proceedings, Cheng Du: 2006. 49-67.
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, 成都: 2006. 49-67.
- 3 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, (7):
- 4 Salamitou Philippe, Dabas Alain, Flamant Pierre H. Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar[J]. Appl Opt, 1995, 34(3): 499-506.
- 5 Kameyama S, Ando T, Asaka K, *et al.*. Performance of discrete-Fourier-transform-based velocity estimators for a wind-sensing coherent Doppler lidar system in the Kolmogorov turbulence regime[J]. IEEE Transactions on, Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10): 3560-3569.
- 6 Rye B J, Hardesty R M. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. II. Correlogram accumulation [J]. IEEE Transactions on, Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 28-35.
- 7 Zrnic D S. Spectral moment estimates from correlated pulse pairs[J]. IEEE Transactions on, Aerospace and Electronic Systems, 1977, AES-13(4): 344-354.
- 8 Frehlich Rod. Performance of maximum likelihood estimators of mean power and Doppler velocity with a priori knowledge of spectral width[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(11): 1702-1709.
- 9 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.
- 10 Li Yanchao. Study on Heterodyne Method and Key Technologies for 2-Micrometer Wind Lidar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

- 李彦超. 2 μm 激光测风雷达外差探测方法与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- 11 Goodman J W. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns[M]. Berlin: Springer, 1975. 9-75.
- 12 Zou Hongxing, Zhou Xiaobo, Li Yanda . Which time-frequency analysis——a survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(9): 78-84.
- 邹红星, 周小波, 李衍达. 时频分析: 回溯与前瞻[J]. 电子学报, 2000, 28(9): 78-84.
- 13 Peng Mingjin, Li Zhi. Analysis and feature extraction of laser micro-Doppler signatures based on Hilbert-Huang transforms[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809004.
- 彭明金, 李 智. 基于希尔伯特-黄变换的激光微多普勒信号分析与特征提取[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809004.
- 14 Cohen L. Time-frequency distributions—a review[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(7): 941-981.
- 15 Wu Zhengguo, Xia Li, Yin Weimin. Modern Signal Processing Technologies: High-End Spectrum, Time-Frequency Analysis and Wavelet Transform[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- 吴正国, 夏 立, 尹为民. 现代信号处理技术: 高阶谱、时频分析与小波变换[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- 16 Li Dongmei. Coherent Doppler Wind Lidar Signal Processing Technology Research[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2009.
- 李冬梅. 相干激光测风雷达信号处理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- 17 Wang Wenlong. Atmospheric Wind Field Modeling and Its Application[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- 王文龙. 大气风场模型研究及应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- 18 Gentry Bruce M, HuaiLin Chen. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): Validation and performance[Z]. 2002: 4484, 74-81.

栏目编辑: 王晓琰