

引用本文: 蒋雨辰, 衣文索, 李东旭, 等. 基于小波分析的多普勒测风激光雷达信号去噪研究[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 17-22.

基于小波分析的多普勒测风激光雷达信号去噪研究

蒋雨辰¹, 衣文索^{2*}, 李东旭², 韩冬子³, 王鑫睿³

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要:针对多普勒测风激光雷达探测大气回波信号微弱和噪声干扰大的问题,提出了基于小波变换的半软阈值算法。首先,对基于小波变换的半软阈值算法原理进行分析,搭建了以马赫-曾德干涉仪作为鉴频器的非相干多普勒测风激光雷达系统;然后,采取硬阈值、软阈值和半软阈值3种算法对激光雷达探测回波信号进行实验。实验结果表明:与其它阈值法相比,半软阈值的信噪比(SNR)为4.933 5 dB,均方根差(RMSE)为0.676 2,去噪效果更优良,有效地提高了大气风速探测精度。

关键词:激光雷达;多普勒测风;小波分析;小波阈值去噪

中图分类号: TN959.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)02-0017-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research on Doppler wind lidar signal denoising based on wavelet analysis

JIANG Yuchen¹, YI Wensuo^{2*}, LI Dongxu², HAN Dongzi³, WANG Xinrui³

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problems of weak atmospheric echo signal and large noise interference detected by Doppler wind lidar, a semi-soft threshold algorithm based on wavelet transform is proposed. Firstly, the principle of semi-soft threshold algorithm based on wavelet transform is analyzed. The incoherent Doppler wind lidar system with Mach-Zehnder interferometer as frequency discriminator is built. Then, three algorithms of hard threshold, soft threshold and semi-soft threshold are used to test the echo signal detected by laser radar. The experimental results show that compared with other threshold methods, the signal-to-noise ratio (SNR) of semi-soft threshold is 4.933 5 dB and the root mean square error (RMSE) is 0.676 2. The denoising effect is better and the detection accuracy of atmospheric wind speed is effectively improved.

Key words: lidar, Doppler wind, wavelet analysis, wavelet threshold denoising

0 引言

风作为大气的重要参数之一,风场探测对于大气科学、飞行器安全等领域尤为关键。多普勒测风激光雷达主要通过低空风切变来监测机场、火箭发射场和军事基地等局部地区的风场,而传统的气象监测方法无法应对低空风切变。虽然传统的气象监测方法可以

根据大气中大颗粒物的散射回波探测风切变,但在晴天情况下,大气中缺少颗粒物,系统测量的精度会大幅度降低;而随着微波多普勒雷达系统的技术发展,多普勒测风激光雷达系统可以通过多普勒频移来获取风速^[1-3],测量精度和准确度非常高。

多普勒测风激光雷达信号的探测方法分为外差(相干)探测和直接(非相干)探测。其中,外差探测是在发射脉冲激光到大气中后,将出射激光与大气回波光信号混频处理,并对信号进行频谱分析,通过本振光和回波光之间的频差反演出大气风速;直接探测是使用干涉仪或气体池检测回波光信号的频移,通过频移引起探测器信号强度变化量反演风速。随着高功率激光器的迅速发展,直接探测技术也得到了迅速发展。1989年,法国的 CHANIN M L 等人^[4]首次报告了将

收稿日期: 2022-06-16。

作者简介: 蒋雨辰(1997—),女,硕士研究生,吉林长春人,现就读于长春理工大学光电工程学院电子信息专业,主要从事大气激光传感技术、现代光纤传感技术、光/电转换技术的研究以及微弱信号的检测与处理。

***通信作者:** 衣文索(1971—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感器、震动监测传感器等方面研究工作。



蒋雨辰, 衣文索, 李东旭, 等: 基于小波分析的多普勒测风激光雷达信号去噪研究

双法布里-珀罗(F-P)干涉仪作为鉴频器的直接测风激光雷达信号的探测结果, 测量的时间分辨率为 2 h, 空间分辨率为 2 km。国内的直接测风激光雷达技术起步较晚, 最早建成的直接探测多普勒测风激光雷达系统是由 LIU Z S 等人^[5]于 1997 年研制, 该系统将具有碘分子在 532 nm 附近的吸收线存在陡峭边缘这一特性的碘滤波器作为鉴频器件, 碘分子在探测时吸收池被加热到了 338 K, 因此对温度控制的要求很高。2009 年, 中国科学技术大学^[6]成功研制了一套可用于平流层探测的车载式瑞利多普勒激光雷达系统, 主要目的是为临近空间环境研究提供风场探测手段和数据支撑。虽然直接探测方法的灵敏度、测风精度和空间分辨率很高^[7], 但是由于受到太阳光、月光和星光等自然光辐射^[8]、大气分子对激光的折射和吸收以及探测器噪声等影响, 使得微弱回波信号被噪声淹没, 探测精度降低。因此, 提高系统信噪比, 并将系统噪声进行有效滤除, 对提高激光雷达系统测风精度是十分有必要^[9-10]。

本文采用小波变换的半软阈值算法对多普勒测风激光雷达回波信号进行处理, 在保留有用信号的同时还能够有效去除噪声成分。

1 基于小波变换的半软阈值算法原理

基于小波变换的半软阈值算法原理如下: 首先, 激光雷达回波光信号经过光/电转换转变为电信号; 然后, 采用风速反演算法将信号转变为大气风速信息; 最后, 再采用本文提出的基于小波变换的半软阈值算法滤除激光雷达噪声。

1.1 激光雷达噪声

多普勒激光雷达接收到的光信号通过光/电转换进入电路, 其中包括大气环境的背景噪声和探测器噪声。背景噪声通过雪崩二极管(APD)的通光特性和滤波片滤除其它波段的光信号, 而探测器噪声通过滤波电路去噪时易将微弱的有用信号一并去除, 所以要谨慎使用滤波电路。探测器中主要存在的噪声有散粒噪声、热噪声和 1/f 噪声等。

散粒噪声电流 i_n 和热噪声电流 i_j 的均方根值分别为

$$i_n = \sqrt{2qI_p M^2 F(M) B} \quad (1)$$

$$i_j = \sqrt{4kH_f B / R_f} \quad (2)$$

其中, q 为电荷常量, I_p 为光生电流, M 为探测器倍增系数, $F(M)$ 为探测器与 M 相关的过剩噪声因子, B 为器件带宽, k 为玻尔兹曼常数, H_f 为电阻温度, R_f 为反馈电阻大小。1/f 噪声在低频端调制频率高于 1 kHz 时可以减小。

在探测风速时, 接收到激光经过大气散射后的回波光信号, 并通过该信号的光功率来计算噪声和系统的信噪比(SNR)。

直接探测激光雷达的 SNR 计算公式为

$$I_{\text{SNR}} = \frac{\eta_0 P_s^2}{h\nu [2B(P_s + P_{\text{bk}})] + K_1 P_{\text{DK}} + K_2 P_{\text{Th}}} \quad (3)$$

其中, η_0 是探测器的量子效率, h 是普朗克常数, ν 是激光频率, P_s 是接收信号光功率, P_{bk} 是背景光功率, P_{DK} 是探测器暗电流功率, P_{Th} 是等效热噪声功率; 探测器暗电流功率系数 K_1 与等效热噪声功率 K_2 相等。

1.2 风速反演原理

激光与大气的气体分子碰撞发生的散射为瑞利散射, 主要用于探测气溶胶粒子少的高层大气风场。米散射是激光经过大气中气溶胶粒子的散射, 主要用于探测多云、多灰尘的低空大气风场。本文采用直接探测技术, 并使用高光谱分辨率的鉴频器件来获取频移信号从而得到频移, 经过反演算法最终得到径向风速。

米散射和瑞利散射后的归一化光强与波数的关系用高斯分布表示为

$$I(\sigma) = \frac{1}{\delta\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{\delta^2}\right] \quad (4)$$

其中, σ 为激光回波的中心波数, σ_0 为出射激光波数, δ 为频谱分布上峰值 1/e 高度处的半宽度。气溶胶粒子较大, 产生的米散射谱线宽度近似于出射激光谱宽, 而出射激光的谱宽小于大气分子的瑞利展宽, 可表示为

$$\gamma = \frac{2\sigma_0}{c} \sqrt{\frac{2kQ}{m}} \quad (5)$$

其中, c 为光速, Q 为大气环境温度, m 为大气分子平均质量。以马赫-曾德尔干涉仪作为多普勒测风激光雷达系统的鉴频器, 回波信号到达不同通道的光电探测器的光强不同, 双通道马赫-曾德尔干涉仪零线宽激光入射的两通道透过率函数为

$$\begin{cases} T_1 = I_1 / I_0 = \sin^2(\pi\sigma O) \\ T_2 = I_2 / I_0 = \cos^2(\pi\sigma O) \end{cases} \quad (6)$$

其中, I_0 为出射激光光强, I_1 为到达第一通道光电探测器的光强信号, I_2 为到达第二通道光电探测器的光强信号, O 为马赫-曾德尔干涉仪光程差。每个通道的总信号强度为频率激光分量与透过率的卷积, 表示为

$$\begin{cases} I_1(\sigma) = I_0(\sigma) \otimes T_1 \\ I_2(\sigma) = I_0(\sigma) \otimes T_2 \end{cases} \quad (7)$$

根据双边缘测风原理, 一般将马赫-曾德尔干涉

仪两通道透过率曲线交点处作为出射激光最佳工作点,因为此时的透过率 $T_1=T_2$ 。当没有发生多普勒频移时,两通道输出的总信号强度相同;当由于回波信号中心波数变化而发生多普勒频移时,两通道输出的总信号强度发生变化,其中激光回波信号的中心波数为

$$\sigma=\sigma_0\left(1+\frac{2V}{c}\right) \quad (8)$$

其中, $\sigma=1/\lambda=\omega/c$, ω 为频率, λ 表示波长, V 为径向大气风速。因此,多普勒频移 $\Delta\omega$ 与风速的关系为

$$\Delta\omega=\frac{2V}{\lambda} \quad (9)$$

1.3 小波变换原理

不同于傅里叶变换,小波变换不需要窗函数划分时域信号,避免了由于窗的尺寸设置不当导致分析不够精准、分辨率低等问题。连续小波变换定义为

$$W(a, \tau)=\frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (10)$$

其中, a 为小波函数的伸缩尺度, τ 为小波函数的平移量, Ψ^* 为母小波参数, t 为时间。信号经过伸缩和平移的小波变换之后,可以利用提取到的有用信息精准定位时域与频域的局部信息进行多分辨率分析。在模板大值方法、小波阈值法和小波系数相关去噪法这3种小波去噪方法中,小波阈值法的计算量最小,更适用于处理 SNR 低的信号,因此本文采用该方法对测风激光雷达回波信号进行处理。

小波去噪是通过小波分解和信号重构进行去噪。首先选择小波基函数将含噪信号分解至 N 层,然后分别对不同层数的小波系数进行阈值处理,最后通过小波逆变换重新构造信号。本文实验中,通用阈值 (sqtwolog 规则) 选取为

$$\lambda_1=\sigma_1 \sqrt{2 \log N_1} \quad (11)$$

其中, σ_1 为信号标准差, N_1 为信号长度。确认阈值后对其进行处理,常用的硬阈值法、软阈值法的小波系数表达式为

$$W(h)=\begin{cases} W, & |W| > T_h \\ 0, & |W| \leq T_h \end{cases} \quad (12)$$

$$W(s)=\begin{cases} \text{sign}(W)(|W|-T_h), & |W| > T_h \\ 0, & |W| \leq T_h \end{cases} \quad (13)$$

其中, $W(h)$ 为硬阈值小波系数, $W(s)$ 为软阈值小波系数; T_h 为阈值。硬阈值法会使重构信号产生振荡,主要是因为硬阈值函数具有间断性;软阈值法的优点是连续性好,缺点是滤噪后小的特征值会被噪声所淹没,导致处理后的信号失真。因此,描述信号的特征值

时可以采用硬阈值法,描述整体信号特征时可以采用软阈值法。

针对传统阈值函数的优缺点,本文采用半软阈值法对多普勒测风激光雷达回波信号进行去噪处理。半软阈值函数为

$$W=\begin{cases} 0, & |W| \leq T_h \\ \text{sign}(W) \frac{T_h(|W|-T_h)}{T_h-T_h}, & T_h < |W| < T_h \\ W, & |W| > T_h \end{cases} \quad (14)$$

其中, T_h 为下阈值, T_h 为上阈值。根据信号的形式调整下阈值;当信号高频部分居多时,为保存信号的细节,通常选取较小的 T_h ;当信号高频部分较少时,为了更好地去噪,通常选取较大的 T_h 。与传统傅里叶变换的信号处理方法相比^[11-14],小波变换将信号分解成低频和高频2个部分,它们都具有不同的时域和频域分辨率特性^[15],可以更灵活地结合时域和频域来处理信号。

2 实验分析

2.1 实验系统

多普勒测风激光雷达系统结构图如图1所示。系统参数如表1所示。系统由光学收发子系统、鉴频子系统、信号采集子系统和控制子系统构成。光学收发子系统由激光器 A_1 、不等比分光镜 B_1 和望远镜组成。激光器 A_1 发射1束激光,不等比分光镜 B_1 把这束激光分成2束,其中1束作为参考光,参考光再分成2路,1路经过光/电转换直接进入信号采集系统,用于监测能量;鉴频子系统输入端口 C_2 接收另一路的参考光。光学接收系统接后向散射信号,进入鉴频器第二个输入端口 C_1 ,经鉴频器输出端口输出并送入信号采集子系统。鉴频子系统采用马赫-曾德尔干涉仪。鉴频器输出信号的能量会根据风场引起的大气散射回波信号多普勒频移的变化而变化,据此可以反演视线方向大气风场大小。

实验中激光器 A_1 的波长为 532 nm。为解决出射激光与望远镜不共轴的激光雷达测风存在盲区的问题,本文采用同轴光学收发系统,搭建的多普勒激光雷达实验平台如图2所示。将马赫-曾德尔干涉仪作为鉴频器提高系统稳定性,其光程差取 4.7 cm。经过大气散射的散射光通过 APD 和光/电转换电路进行转换,由放大电路放大信号。本文利用现场可编程门阵列 (FPGA) 对激光器发射的光脉冲和数据采集进行时序的统一控制。

蒋雨辰,衣文索,李东旭,等:基于小波分析的多普勒测风激光雷达信号去噪研究

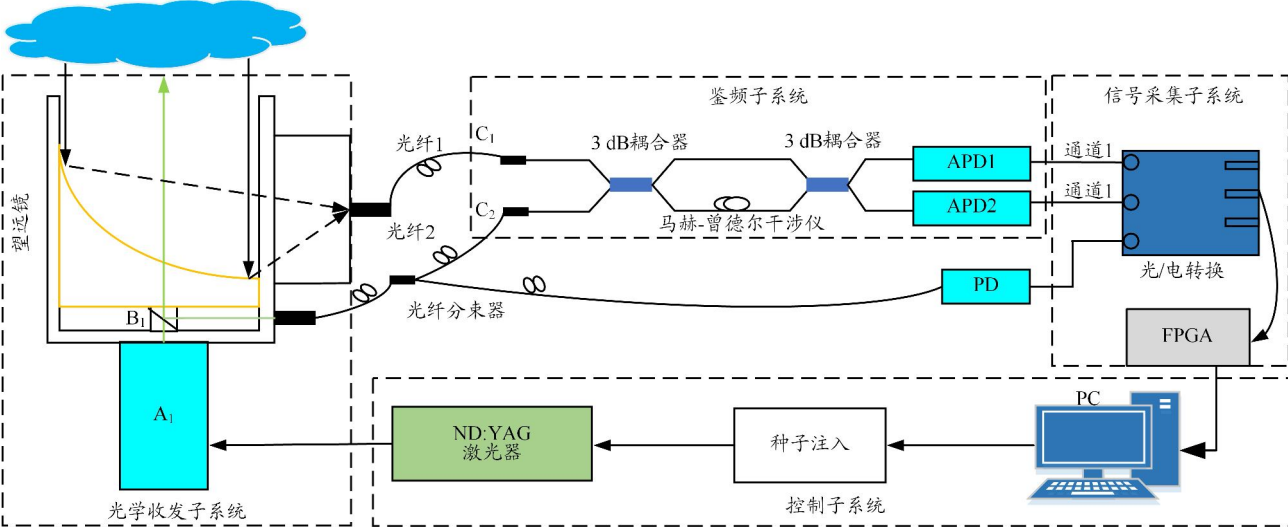


图 1 多普勒测风激光雷达系统

表 1 多普勒激光雷达系统参数

名称	参数	数值
Nd:YAG 固体激光器	波长/nm	532
	光束发散角/mrad	0.8
	脉冲宽度/ns	20
	脉冲能量/ μ J	17
	光斑直径/mm	2
离轴抛物面 反射镜	口径/mm	100
	反射焦距/mm	150
	有效通光孔径	>90%机械半径
	反射率	>97%@532 nm
APD	波长响应范围/nm	400~1 100
	峰值波长/nm	905
	带宽/GHz	1.25

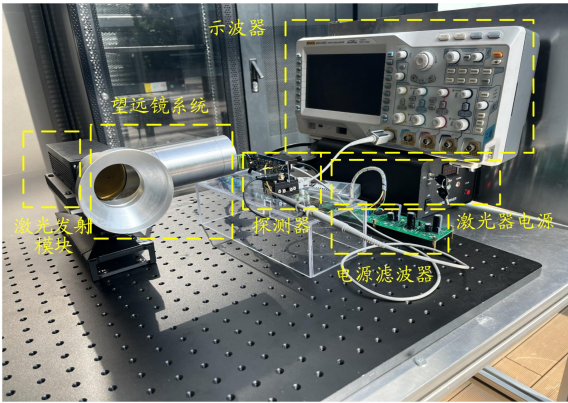


图 2 多普勒测风激光雷达实验平台

在信号采集子系统内,FPGA 数据采集具有时钟频率高、内部时延小、组成方式灵活和易于修改的特点,适用于高速数据采集的场合。高速信号处理由擅长于处理密集的乘加运算的数字信号处理器(DSP)完成。

2.2 实验结果与分析

为了检验对多普勒测风激光雷达回波信号进行半软阈值法小波去噪的效果,本文采用软、硬阈值法处理信号,并对不同算法进行仿真实验。

首先,建立出射激光模型。假设激光器发射的是理想的高斯脉冲信号,脉冲宽度为 20 ns,其表达式为

$$F(\alpha)=A\exp\left[-\frac{(\alpha-u)^2}{b^2}\right]$$
 (15)

其中,A 为脉冲最大幅值, α 为脉冲信号 $F(\alpha)$ 的横坐标, u 为脉冲峰值位置, b 为脉宽。

然后,建立回波信号模型。经过大气后向散射的回波信号由有用信号和噪声信号组成,其表达式为

$$S(t)=X(t)+N(t)$$
 (16)

其中, $X(t)$ 为有用信号, $N(t)$ 为随机噪声。图 3 为 Matlab 仿真激光雷达探测信号经过 1 500 m 高度大气散射后,接收到的原始回波信号与加噪回波信号对比图。可以看出,高度在 300 m 内探测的信号强度变化明显,即使有噪声的干扰也可以看出变化趋势;高度在 300 m 以上探测到的信号强度变化十分微弱,并且随着高度的增加趋于稳定,但是一旦有噪声干扰,微弱的信号强度变化就会被淹没,无法精准地测量风场信息。

接着,以 db4 小波基函数 6 层分解为例对回波信号进行处理。激光雷达回波信号小波低频和高频系数

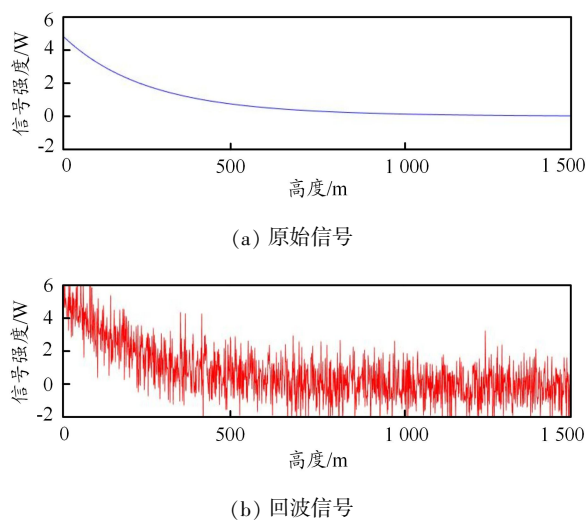


图3 大气探测原始回波信号与加噪回波信号对比

图如图4所示。其中, $a_1 \sim a_6$ 表示小波分解 1~6 层的低频系数, $d_1 \sim d_6$ 表示小波分解 1~6 层的高频系数。可以看出, 随着分解层数的增加, 低频上的有效信号逐渐清晰。这是通过逐层分解来滤除低频部分中的高频信息, 保留的部分为有用信号; 而高频部分信号随着分解层数的增加高频信息也逐渐减小。

分解层数决定信号处理的效果。由于大气风场探测的回波信号比较微弱, 小波分解层数过高会导致探测到的有效信号被滤除, 而分解层数过低会使噪声信

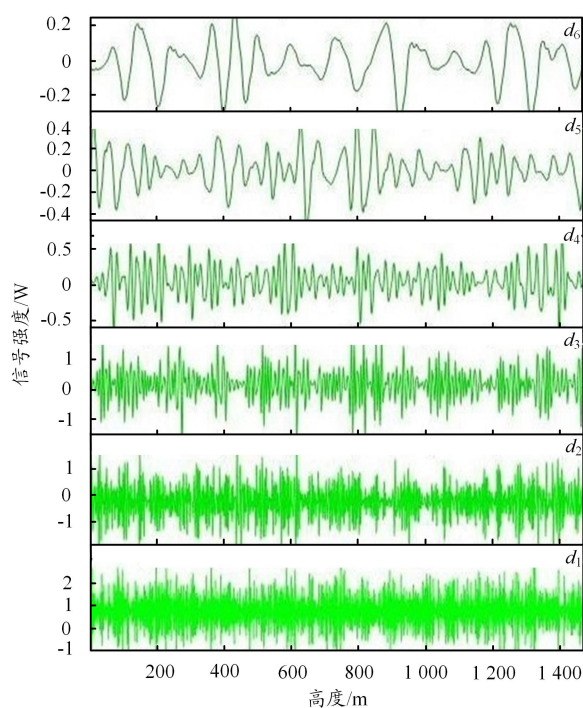
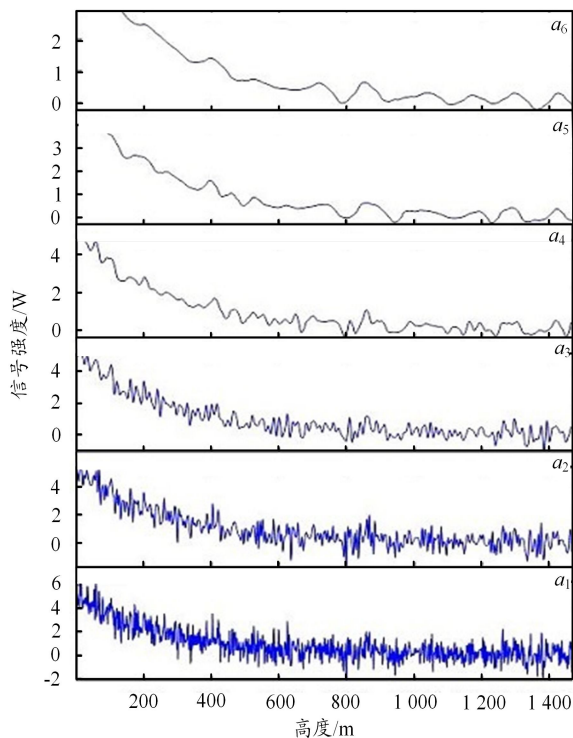


图4 激光雷达回波信号小波系数

号分离不够彻底。本文选取 db4 小波基函数, 通过仿真对比 3 种阈值函数在不同分解层数处理信号的 SNR, 结果如图 5 所示。可以看出, 相较于其它 2 种方法, 采用半软阈值法处理信号的 SNR 更高; 而这 3 种阈值去噪效果随着分解层数的增加而逐渐变好, 在第 4 层分解时达到最高, 接着开始下降。因此, 本文选择 4 层作为实验小波分解层数。

最后, 通过实验对比硬阈值、软阈值和半软阈值处理去噪信号可知, 在同样的 db4 小波基函数 4 层分解后, 虽然采用软阈值法处理后的信号比硬阈值法更



(a) 回波信号小波低频系数

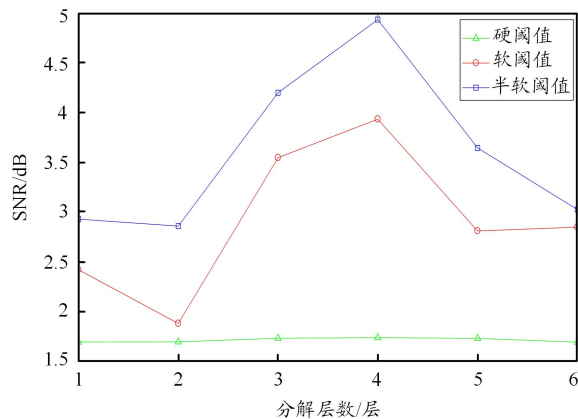


图5 不同分解层数去噪效果对比

蒋雨辰,衣文索,李东旭,等:基于小波分析的多普勒测风激光雷达信号去噪研究

加光滑,但是半软阈值法滤噪效果最好。3种阈值函数对大气探测回波信号的处理对比情况如图6所示。可以看出,经过硬阈值去噪后的信号与回波信号相差无几,经过软阈值去噪后的信号也并未做到大幅度的去除干扰噪声,而半软阈值法在不失真的情况下,将信号噪声处理的更加彻底。

实验结果如表2所示。可以看出,探测到的回波信号经半软阈值法去噪处理后的SNR与软、硬阈值法处理相比提升了1.001 8、3.199 4 dB,均方根差(RMSE)分别降低了0.660 8、1.234 8。半软阈值法处理后系统的SNR更高, RMSE更低,且去噪效果更好。

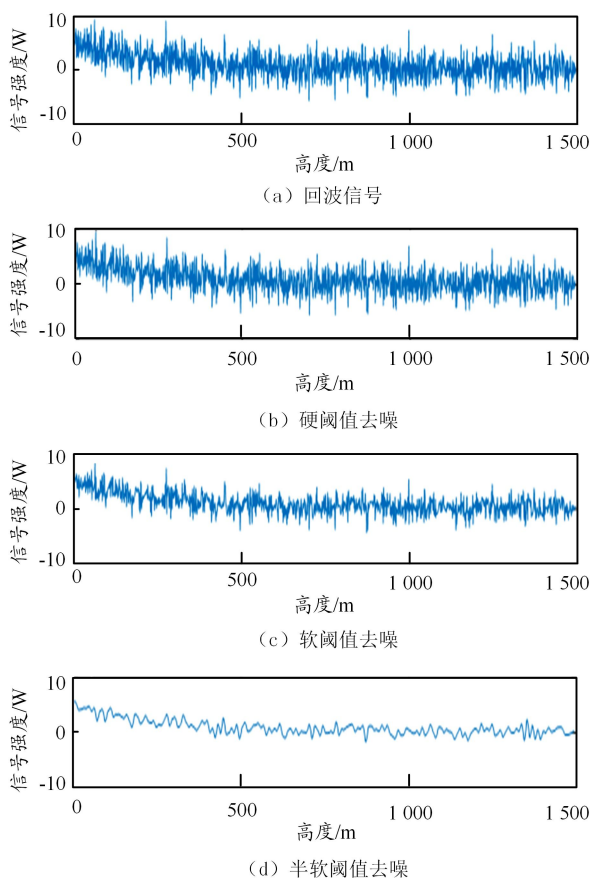


图6 3种阈值函数算法对大气探测回波信号的处理对比

表2 3种阈值函数算法处理大气探测回波信号后的SNR和RMSE

阈值函数算法	SNR/dB	RMSE
硬阈值函数	1.734 1	1.911 0
软阈值函数	3.931 7	1.337 0
半软阈值函数	4.933 5	0.676 2

3 结束语

本文针对多普勒测风激光雷达回波信号提出了基于小波变换的半软阈值去噪算法,搭建了基于马赫-曾德尔鉴频器的激光雷达系统,仿真对比了3种阈值函数算法在不同分解层数下的去噪效果。实验结果表明:4层分解为最优分解层次;在对回波信号处理中,半软阈值法处理后的SNR与软、硬阈值法相比均有所提高(SNR为4.933 5 dB),RMSE均有所降低(RMSE为0.676 2)。因此,采用半软阈值函数处理激光雷达回波信号可以提高探测精度。该研究方法可用于信号微弱、SNR低的大气探测回波信号处理。

参考文献:

- [1] 晏雯秀. 基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的多普勒激光雷达系统及实验研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [2] 陈炳龙,杨忠东,闵敏,等. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(19):38-49.
- [3] 储玉飞,刘东,王珍珠,等. 多普勒测风激光雷达的基本原理与技术进展[J]. 量子电子学报,2020,37(5):580-600.
- [4] CHANIN M L, GARNIER A, HAUCHECORNE A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[M]. [S.l.]: Geophysical Research Letters-GEOPHYS RES LETT, 1989.
- [5] LIU Z S, CHEN W B, ZHANG T L, et al. An incoherent Doppler lidar for ground-based atmospheric wind profiling[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1997, 64(5): 561-566.
- [6] 庄鹏. 基于三通道 FP 标准具的 532nm 对流层多普勒测风激光雷达研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
- [7] 王章军,王睿,李辉,等. 基于相干多普勒测风激光雷达的南极中山站低空大气风场应用研究[J]. 极地研究,2022,34(1):11-19.
- [8] 周艳波. 基于马赫曾德干涉仪的火星风场探测激光雷达技术研究[D]. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所),2019.
- [9] 杜超. 激光雷达回波信号探测及数据处理技术研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [10] 刘国梁,胡坚,王震,等. 基于小波变换的高光谱激光雷达回波微弱信号处理技术[J]. 半导体光电,2018,39(5):747-752.
- [11] 陈禹. FMCW 激光雷达测距测速信号处理算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [12] 周洲,刘元,陈光胜,等. 基于 FPGA 的毫米波雷达信号处理系统设计[J]. 固体电子学研究进展,2021,41(4):291-298.
- [13] 陈鸿凯. 激光多普勒微振动信号处理技术研究及硬件实现 [D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2020.
- [14] 周言文,苗澍苗,姚丹,等. 基于波长调制光谱和小波去噪的激光甲烷遥测系统[J]. 中国激光,2020,47(6):306-314.
- [15] 王伟,吕迎春. 改进小波阈值算法的去噪研究[J]. 科技与创新,2020(11):33-35.