

doi: 10.3788/gzxb20164507.0701002

Mie 散射激光雷达回波信号小波去噪方法

周智荣^{1,2}, 华灯鑫¹, 杨蓉¹, 闫庆¹, 陈浩¹, 宋跃辉¹

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 中航电测仪器股份有限公司, 西安 710100)

摘 要: 针对强背景光下, Mie 散射激光雷达回波信号所含噪声的特点, 提出小波滤波消噪方法. 该方法通过小波变换分离出背景光的直流部分, 并利用小波软阈值消除来自背景光的白噪声和探测系统的电噪声. 为了验证该方法的有效性, 提取并反演了 Mie 散射激光雷达系统实际探测得到的大气回波信号. 反演结果显示有效探测距离从 2.5 km 提高到 5 km, 表明该方法能够在白天背景下有效降低 Mie 散射激光雷达回波信号中的电噪声和背景光的噪声污染.

关键词: Mie 散射激光雷达; 小波变换; 去噪; 强背景光; 软阈值

中图分类号: P415.2; P413

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0701002-6

De-noising Method for Mie Scattering Lidar Echo Signal Based on Wavelet Theory

ZHOU Zhi-rong^{1,2}, HUA Deng-xin¹, YANG Rong¹, YAN Qing¹, CHEN Hao¹, SONG Yue-hui¹

(1 School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 Zhonghang Electronic Measuring Instruments Co., Ltd., Xi'an 710118, China)

Abstract: According to the characteristics of Mie scattering lidar echo signal contaminated by noise in day background light, a de-noising method of wavelets was presented. The daylight direct current component was removed by wavelet transform, and the white noise from background light and electrical noise from detection system were reduced by wavelets soft threshold. To verify the feasibility of the de-noising method, Mie scattering atmospheric lidar echo signal was actually extracted and retrieved, the test results show that the effective detection range can be improved from 2.5 km to 5 km, and the contamination from electric noise and the background light noise can be reduced by the proposed method in measurement of experimentations.

Key words: Mie-scattering lidar; Wavelet transforms; De-noising; Strong background light; Soft threshold

OCIS Codes: 010.3640; 010.0280; 010.1100; 010.1310

0 引言

Mie 散射激光雷达可利用探测大气气溶胶及分子的 Mie-Rayleigh 散射信号, 反演气溶胶、云的消光及后向散射系数, 被广泛应用于边界层、云层、大气污染物的观测和测量中^[1-2]. 在实际应用中, 激光雷达回波信号传播随距离平方衰减, 信号十分微弱. 另外, 激光雷

达系统中不可避免地存在着噪声和干扰源, 包括光电探测系统中的电噪声、热噪声、电源谐波干扰等. 大气气溶胶探测需要全天候进行, 但白天的天空背景光和地面辐射光会污染甚至淹没激光雷达的有效回波信号, 限制激光雷达的有效探测距离和准确度. 因此, 回波信号滤波是不可缺少的重要环节. 目前, 针对太阳背景光的滤除方法主要有硬件和软件两类. 硬件方法主

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61275185)资助

第一作者: 周智荣(1974-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气激光雷达信号处理技术. Email: zrzr@zemic.com.cn

导师(通讯作者): 华灯鑫(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气遥感技术和光电测试技术. Email: dengxinhua@xaut.edu.cn

收稿日期: 2015-12-11; 录用日期: 2016-04-22

<http://www.photon.ac.cn>

要通过加大激光器功率和采用窄带滤光片来实现^[3]；软件滤波方法主要有小波(Wavelets)滤波, Empirical Mode Decomposition (EMD)滤波, Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)滤波, 卡尔曼(Kaman)滤波等^[4-7]. 不同的滤波方法针对不同的信号特征都能起到较好的去噪效果^[8]. 激光雷达探测常用的波长包括 532 nm、355 nm 等, 太阳背景光中包含激光雷达的发射和回波信号的波长, 硬件滤波不能有效滤除与回波信号波长相同的太阳背景光, 必须要通过后续的数字滤波方法进行处理.

Mie 散射激光雷达信号中含有多种噪声^[9-11], 利用小波时频局部化及变换多尺度分析的特性, 在小波域的各个尺度上选取不同的软阈值对激光雷达信号噪声进行滤除^[12-13], 既提升了信噪比, 又提取了信号细节, 对典型的非线性非平稳信号起到很好的滤波效果^[14]. 本文针对气溶胶 Mie 散射信号的噪声特点, 提出了基于软阈值多分辨小波滤波算法的激光雷达回波信号去噪方法, 实现了 Mie 散射激光雷达全天时探测.

1 噪声特点与滤波原理

图 1 展示了太阳背景光下的 Mie 散射激光雷达探测原理, 系统由激光发射、信号接收和数据处理三部分组成. 其中实线部分为发射光和回波信号, 虚线部分为太阳背景光, 回波信号经过望远镜收集后由光纤送入计算机进行数据处理.

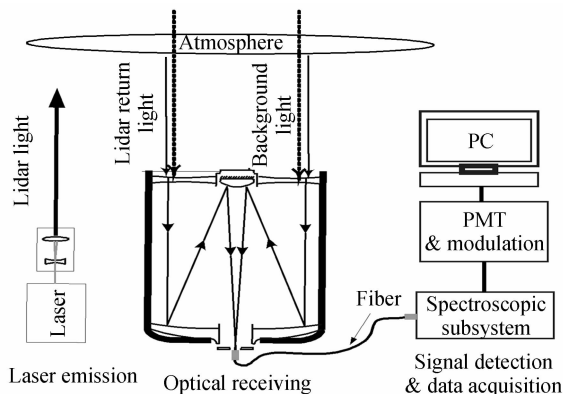


图 1 激光雷达探测原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the lidar system

1.1 噪声特点

白天探测的噪声主要是天空背景光噪声和探测系统的电噪声^[15]. 因此在白天背景光下激光雷达的含噪声回波信号可表达为

$$f(t) = x(t) + e(t) + s(t)$$

式中, $x(t)$ 为 Mie 散射回波真值信号, $e(t)$ 为探测系统电噪声, $s(t)$ 为天空背景光噪声. 滤波的目的就是降低或抑制 $e(t)$ 和 $s(t)$ 对 $x(t)$ 信号的污染程度. Mie 散射激光雷达光电探测系统的电噪声, 具有时间上振幅连续和相位随机的特点, 因此可近似为高频白噪声. 背景

光噪声通过 532 nm 的窄带滤光片进行预处理后被滤除为单一波长的光波, 实现对其的抑制.

小波变换在信号降噪处理中, 针对信号经小波变换后在不同分辨率下呈现不同的规律, 在不同分辨率下设定不同阈值, 调整小波系数以达到降低噪声的目的. 对于离散信号来说, 其高频部分所影响的是小波分解的第一层次细节, 其低频部分所影响的是小波分解的深层, 对于白噪声, 高频系数的幅值随着分解层次的增加而迅速衰减^[16].

1.2 滤波原理

Mie 散射激光雷达回波信号为微脉冲能量有限函数 $f(t) \in L^2(R)$, 由小波多分辨分析的定义, 给出其 V_j 空间下的标准方程组, 即

$$f(t) = \sum a_k^{j-1} \varphi(2^{j-1}t - k) + \sum d_k^{j-1} \psi(2^{j-1}t - k) \quad (1)$$

$$\varphi(2^{j-1}t - l) = \sum h_{k-2l} \varphi(2^{j-1}t - k) \quad (2)$$

$$\psi(2^{j-1}t - l) = \sum (-1)^k \overline{h_{1-k+2l}} \varphi(2^{j-1}t - k) \quad (3)$$

$$a_l^{j-1} = \frac{1}{2} \sum \overline{h_{k-2l}} a_k^j \quad (4)$$

$$d_l^{j-1} = \frac{1}{2} \sum (-1)^k \overline{h_{1-k+2l}} a_k^j \quad (5)$$

$$a_k^j = \sum \overline{h_{k-2l}} a_l^{j-1} + \sum (-1)^k \overline{h_{1-k+2l}} d_l^{j-1} \quad (6)$$

式中, $\sum \varphi(2^{j-1}t - k)$ 为信号低频部分, $\sum d_k^{j-1} \psi(2^{j-1}t - k)$ 为信号高频部分, $\varphi(2^{j-1}t - k)$ 为尺度函数, $\psi(2^{j-1}t - k)$ 为小波函数. 式(4)和(5)分别为粗糙系数和细节系数的递推方程, 式(6)为重构方程. 由此 Mie 散射激光雷达回波信号被分解为高频信号和低频信号, 其中低频信号的起伏主要由不同高度处不同质量密度的气溶胶粒子引起, 而高频信号主要是光电探测器件暗电流、电路元件及杂散光产生的噪声信号. 小波消噪的基本方法是利用小波多尺度变换把回波信号分解到多尺度中, 由于白噪声小波系数的平均功率与尺度成反比, 其幅度随着小波分解层数 j 的增加而不断衰减, 其能量分散于大量的小波系数上, 且白噪声的小波系数仍是白噪声, 有用的回波信号经小波变换后, 其能量被压缩到相对较少而数值较大的小波系数上. 在每一尺度下把属于噪声的小波系数按算法去除, 保留属于回波信号的小波系数, 最后利用式(6)重构出小波消噪后的激光雷达回波信号.

因此, 对激光雷达所探测的含噪声信号进行精细提取和去噪的步骤为:

- 1) 确定小波基类型和信号分解的层次, 对探测得到的强背景噪声下的激光雷达原始信号进行分解;
- 2) 对小波分解高频系数的阈值量化, 对各个层次尺度下的高频系数选择一个阈值进行阈值量化处理;
- 3) 去除激光雷达信号中的系统噪声并探测去除

太阳背景光信号;

4) 根据小波分解的最底层低频系数和各层高频系数进行小波重构,恢复回波信号。

由于不同小波基的特性不同,其选取对滤波效果影响很大,依据激光雷达方程,有

$$f(R) = \frac{C_R}{R^2} \beta(R) \cdot \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right] \quad (7)$$

式中, $f(R)$ 为回波信号, C_R 为激光雷达系统关联参量, $\beta(R)$ 为后向散射系数, $\alpha(r)$ 为消光系数。依据式(7)选择 Daubechies 小波,该小波具有双正交性、紧支撑性和近似对称性,十分适合对指数衰减型曲线进行滤波^[17-18]。

对变换系数进行阈值处理的方法可以分为硬阈值法和软阈值法。硬阈值处理是把信号小波变换系数的绝对值与阈值比较,小于阈值的小波系数变为零,大于阈值的小波系数不变,再根据小波系数进行信号重建;软阈值处理是把小波系数大于阈值的变为该点与阈值的差值。在实际的消噪过程中,软阈值可针对不同的信号和噪声特点通过经验获得,且这种阈值比默认值的可信度高,因此本文选择软阈值滤波。小波阈值选取规则有长度对数阈值法、无偏似然估计阈值法、启发式估计阈值法和最小极大方差阈值法,其中启发式阈值法是长度对数和无偏似然估计阈值法的综合,该方法在激光雷达大气探测实践中取得较好的去噪效果^[9]。本文采用启发式阈值法,阈值选择公式为

$$\lambda_{\text{heursure}} = \begin{cases} \sigma \sqrt{2 \ln N} & \beta < \gamma \\ \min(\sigma \sqrt{2 \ln N}, \sigma \sqrt{w_i}) & \beta \geq \gamma \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\gamma = \sqrt{N \log(2^N)^3}$, $\beta = (\sum_{n=1}^N w_n^2 - N) / N$, N 为待分析细节层的小波系数个数, σ 为噪声标准差估计。启

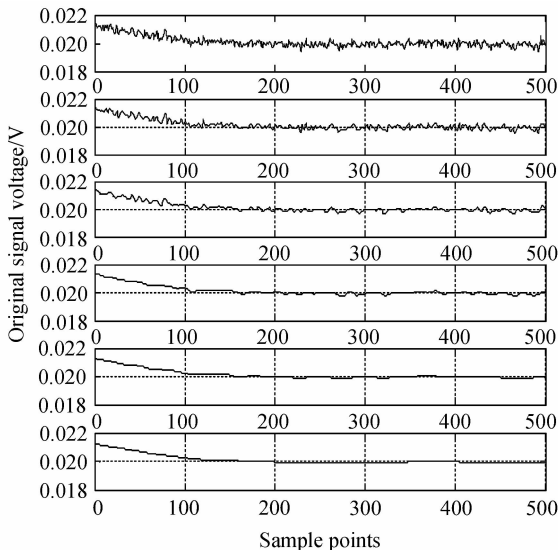


图2 小波近似系数

Fig. 2 Wavelet approximate coefficients of signal

发式阈值法的阈值计算步骤为:首先将第 j 层的小波系数 d_n^j 的平方按照升序排列,得到一个向量 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N]$, ($\omega_1 \leq \omega_2 \leq \omega_3 \leq \dots \leq \omega_N$);然后计算风险向量 $\mathbf{R} = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_N]$,由式(9)解出向量 \mathbf{R} 中最小的 r_i ,求出对应的 ω_i ,即

$$r_i = (N - 2i + (n - i)\omega_i + \sum_{k=1}^i \omega_k) / N \quad (9)$$

依据激光雷达方程,对 1.5~4.5 km 之间的 400 个点进行了低频部分和高频部分分解。图 2 为近似系数 a_i^{-1} 的 5 阶分解系数,图 3 为细节系数 d_i^{-1} 的 5 阶分解系数,由图 2 和图 3 可以看出分解到第 5 层时,噪声对特征信号的平滑度影响可忽略不计。

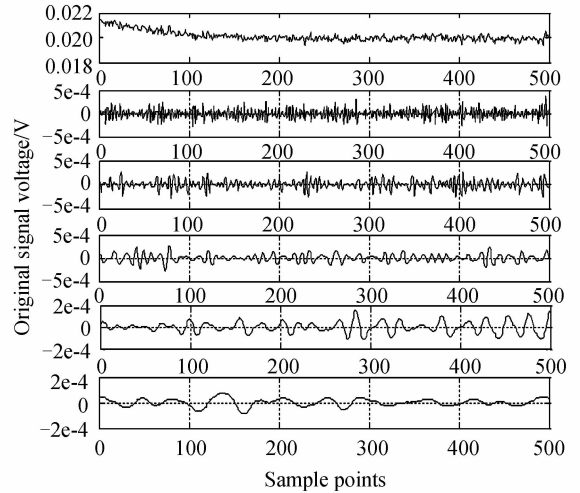


图3 小波细节系数

Fig. 3 Wavelet detail coefficients of signal

2 实验结果分析

2011 年 5 月利用微脉冲 Mie 散射激光雷达在西安地区(34.233°N,104.003°E)进行了大气气溶胶连续观测实验,其参量见表 1。

激光雷达采样频率为 40 M/s,单次采集 2 500 个点,采样间隔为 10 s。由于太阳背景光前后 10 s 会有波动的可能,所以不能采用脉冲累积平滑预处理。这 2 500 个点采用 Daubechies 小波分解后,利用软阈值统一去除噪声。其中最后 500 个点作为太阳背景光信号,前 2 000 个点统一扣除背景光后存入 Excel 数据库备份。利用小波去噪的方法对实验结果进行了反演与分析,结果表明该方法可以有效去除白天条件下天空背景光噪声,提高激光雷达系统白天的探测能力,对于研究边界层内大气气溶胶的变化具有重要意义。

滤波首先要从原始探测的回波信号中去除电噪声和杂散光,提取有用的回波信号。图 4 为去噪前后激光雷达实测的电信号图,其横坐标为采样点数,每个点代表 7.5 m 的高度,纵坐标为电压信号。细实线部分为原始回波信号,粗实线部分为去除噪声后提取的回波信

号.从图4可知,去噪后的回波信号比去噪前的回波信号平滑,表明一定程度上滤除了系统噪声.

表1 Mie 散射激光雷达配置参量

Table 1 Specification parameters of Mie scattering lidar

Parameter		Value
Transmitter	Type	Q-switched Nd : YAG
	Wavelength/nm	532
	Maximum pulse energy/ μJ	50
	Pulse repetition frequency/kHz	1
	Pulse width/ns	15~20
	Laser beam diameter/mm	3.5
	Laser beam divergence/mrad	<0.5
Receiver	Optical design	Schmidt- Cassegrain
	Focal Ratio/mm	$f/10$
	Focal length/mm	2500
	Optical tube dimension/mm	254
	Field of view/mrad	0.4
Data system (analog detection)	Detector	PD and PMT
	Transient recorder	A/D converter
	Sample rate/($\text{M} \cdot \text{s}^{-1}$)	40
Narrow bandwidth filter	Center wavelength/nm	532.15
	Bandwidth/nm	0.2

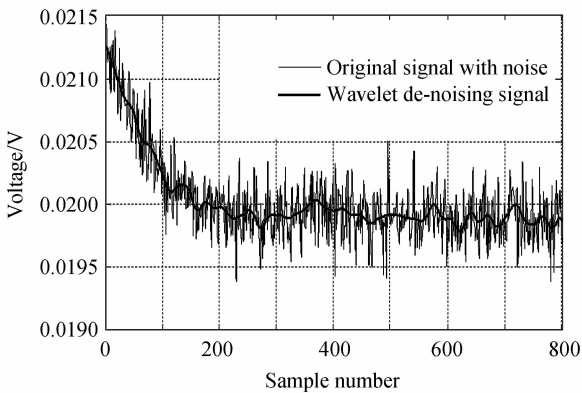


图4 去噪前后的原始信号图

Fig. 4 De-noising original signal with soft threshold of wavelets

滤除噪声信号后,要提取太阳背景光的特征信息并去除太阳背景光.由于太阳背景光由激光雷达系统采集,其同样受到噪声的污染.图5为激光雷达采集到的太阳背景光信号,细实线部分为背景光原始信号,粗实线部分为去除噪声后提取的背景光信号.从图5可知,其探测的太阳背景光的幅度在0.0198~0.02 V之间,在很短的时间内近似为直线,整体表现为直流信号.

为了对比滤波的效果,对探测信号滤波处理后,要反演气溶胶消光系数,获得大气气溶胶的状态信息.图6

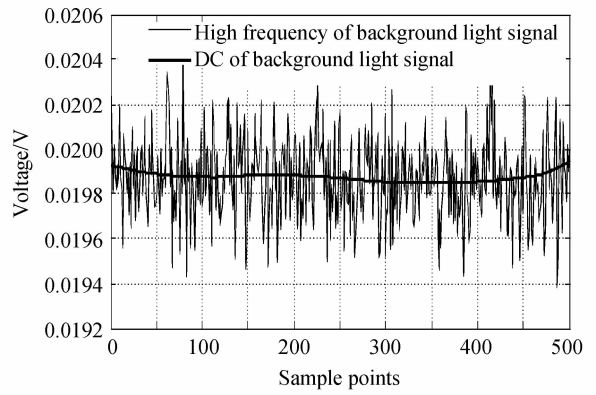


图5 白天检测的天空背景光直流信号

Fig. 5 Part DC extraction from background signal in daytime

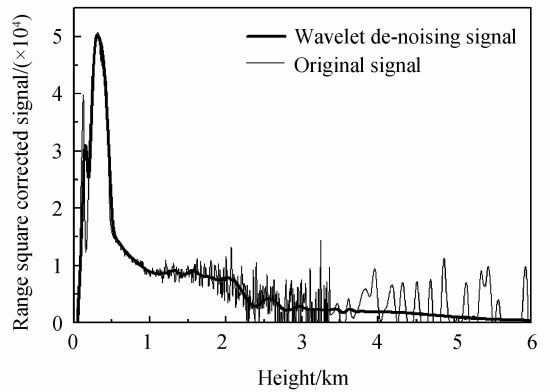


图6 2011年5月23日上午10时激光雷达RSCS信号图

Fig. 6 RSCS profile of Mie lidar on May 23, 2011
10:00 am

是结合探测数据与激光雷达方程绘制的距离平方校正信号图(Range-Square-Corrected Signal, RSCS).图6中细实线部分为利用去噪前信号反演的RSCS信号,从1.5 km后开始噪声信号强,不能提取气溶胶的有用信息;粗实线部分为利用去噪后信号反演的RSCS信号,信号平滑且有效探测距离提高到5 km,气溶胶变化的细节信息清晰可见.信噪比公式为

$$\text{SNR} = 10 \log \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N S^2(n)}{\sum_{n=1}^N [S(n) - \hat{S}(n)]^2} \right\} \quad (10)$$

式中, $S(n)$ 为原始信号第 n 个点, $\hat{S}(n)$ 为相对应滤波后的第 n 个点.计算得到信噪比为54.95.

利用Klett法反演得到气溶胶消光系数廓线如图7.图7中细实线部分为原始信号反演的消光系数廓线,由于噪声的影响,在1.5 km后气溶胶细节信息淹没在噪声信号中,不能获得其变化特征;粗实线部分为利用去噪后信号反演的气溶胶消光系数廓线,在5 km范围内具有高的信噪比,气溶胶的细节信息得到有效辨别,提高了系统的白天探测能力.

图8和图9分别表示2011年5月4日7点到11

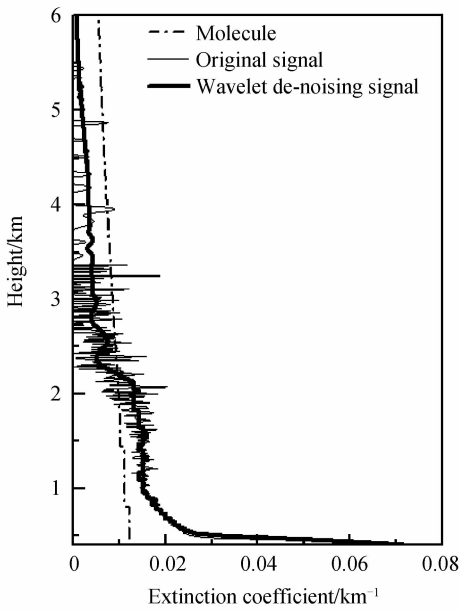


图7 2011年5月23日上午10时气溶胶消光系数廓线
Fig.7 Profile of aerosol extinction coefficient of Mie lidar scattering signal on May 23, 2011 10:00 am

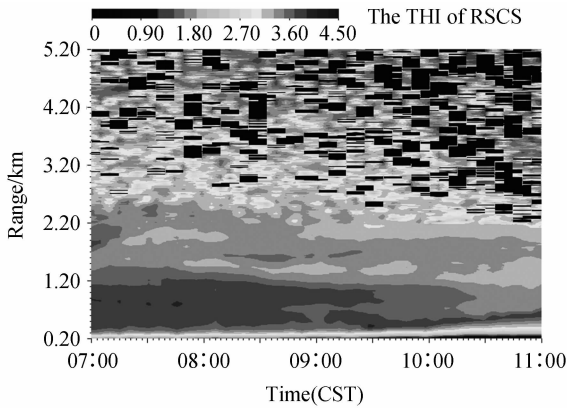


图8 2011年5月4日7点到11点去噪前RSCS的THI图
Fig.8 THI display of the original signal RSCS profiles taken between 7:00 CST and 11:00 CST on May 4, 2011

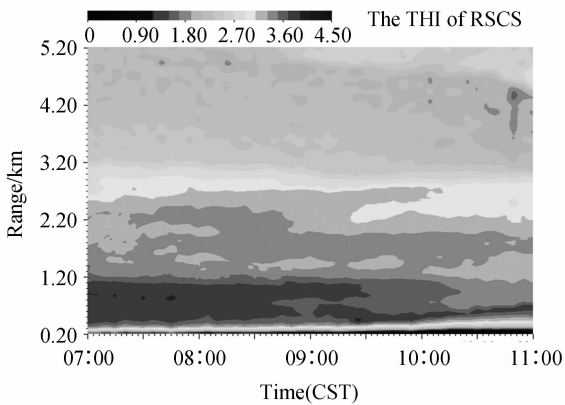


图9 2011年5月4日7点到11点去噪后RSCS的THI图
Fig.9 THI display of the De-noised signal RSCS profiles taken between 7:00 CST and 11:00 CST on May 4, 2011

点去噪前后的 RSCS 信号随时间变化的 Time-Height-Indicator(THI)图。图8中的黑色区域为噪声影响区域,3 km以上的大气信息淹没在噪声中不能有效获得。图9中噪声信号得到了滤除,大气变化信息得到了重现,变化层次感清晰且分明。

3 结论

根据 Mie 散射激光雷达信号和噪声的特点,提出一种小波软阈值去噪方法,从强背景光中提取弱信号。通过对原始信号和滤波去噪信号中距离平方校正信号和消光系数的对比,表明在实际应用中本方法能够在一定程度上滤除噪声,提高激光雷达系统在白天的探测能力,对研究气溶胶的变化规律,特别是对雾霾的生成机理有重要意义。

参考文献

- [1] LIU Jun. Study of the lidar techniques for remote sensing of the atmospheric temperature and aerosol profiles[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
刘君. 大气温度及气溶胶激光雷达探测技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [2] BU Ling-bing, YUAN Jing, GAO Ai-zhen, et al. Analysis of haze-fog events based on laser ceilometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0901002.
卜令兵, 袁静, 高爱臻, 等. 基于激光云高仪的雾霾过程探测[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0901002.
- [3] YAN Qing, HUANG Deng-xin, LI Shi-chun, et al. Observation and productization of the micro-pulsed Mie scattering lidar system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* 2013, **30**(1): 123-128.
闫庆, 华灯鑫, 李仕春, 等. 微脉冲米散射激光雷达系统的产品化研发及实验观测研究[J], *量子电子学报*, 2013, **30**(1): 123-128.
- [4] DONOHO BDL. De-noising by soft-tresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, **41**(3): 612-627.
- [5] XU Duo, SHEN Guo-qin, QIAN Zu-ping. Research on separation for mixed signals based on ensemble empirical mode decomposition [J]. *Journal of Military Communications Technology*, 2011, **32**(2): 27-32.
许舵, 沈国勤, 钱祖平. 基于 EEMD 方法的混合信号分离识别[J]. *军事通信技术*, 2011, **32**(2): 27-32.
- [6] ZHENG Fa-tai, HUA Deng-xin, ZHOU A-wei. Empirical mode decomposition algorithm research & application of Mie lidar atmospheric backscattering signal [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2009, **36**(5): 1068-1074.
郑发泰, 华灯鑫, 周阿维. Mie 散射激光雷达大气回波信号经验模式分解算法的研究与应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1068-1074.
- [7] WANG Shu-tao, LI Mei-mei, LI Pan, et al. Signal processing method based on empirical mode decomposition in the SO₂ concentration monitoring [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0228002.
王书涛, 李梅梅, 李盼, 等. 基于经验模态分解的 SO₂ 浓度检测信号处理方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0228002.
- [8] CHEN Dong, WANG Jiang-an, KANG Sheng. Comparison of backscattering lidar signal denoising methods[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, **33**(4): 93-97.
陈冬, 王安, 康圣. 脉冲激光雷达信号降噪方法对比[J]. *舰船科学技术*, 2011, **33**(4): 93-97.

- [9] FANG H T, HUANG D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform [J]. *Optics Communications*, 2004, **233**(s1-3):67-76.
- [10] PALETI R, KUMAR Y B, CHAITANYA T K. Wavelet transform method for deriving atmospheric boundary layer height from lidar signals [J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2013, **5**(2): 1465-1472.
- [11] WERNER R, STEBEL K, HANSEN G H, *et al.* Application of wavelet transformation to determine wavelengths and phase velocities of gravity waves observed by lidar measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(17-18): 2249-2256.
- [12] WU Dong-mei. Signal estimation with multiresolution threshold using principle of SURE in wavelet basis [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2005, **25**(3): 345-348.
吴冬梅. 小波基下的多分辨率 SURE 阈值信号估计[J]. 西安科技大学学报, 2005, **25**(3): 345-348.
- [13] YIN Ming, BAI Rui-feng, XIN Yan, *et al.* De-noising algorithm by non-sub-sampled dual-tree complex wavelet domain bivariate model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 1010004.
殷明, 白瑞峰, 邢燕, 等. 基于非下采样双树复小波域的双变量模型去噪算法[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 1010004.
- [14] BROOKS I M. Finding boundary layer top: application of wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2003, **20**(8): 1092-1105.
- [15] ZHANG Gai-xia, ZHAO Yue-feng, ZHANG Yin-chao, *et al.* A lidar system for monitoring planetary boundary layer aerosol in daytime [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 7390-7395.
张改霞, 赵曰峰, 张寅超, 等. 激光雷达白天探测大气边界层气溶胶[J]. 物理学报, 2008, **57**(11): 7390-7395.
- [16] ZHAO Song, JIANG Han-hong, ZHANG Chao-liang, *et al.* Radar signal denoising based on improved wavelet thresholding functions [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, **30**(7): 1-3.
赵松, 江汉红, 张朝亮, 等. 基于改进小波阈值函数的雷达信号去噪[J]. 兵工自动化, 2011, **30**(7): 1-4.
- [17] MAO Jian-dong, HUA Deng-xin, WANG Yu-feng, *et al.* Noise reduction in lidar signal based on wavelet packet analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(2): 0209001.
毛建东, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 基于小波包分析的激光雷达信号消噪算法的研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0209001.
- [18] QIN Ya-hui, FENG Jing-hui, CHEN Li-ding. Study of signal de-noising methods based on wavelet transform [J]. *Information Technol*, 2010, **01**: 53-57.
秦亚辉, 冯景辉, 陈立定. 基于小波变换的信号去噪方法研究[J]. 信息技术, 2010, **1**: 53-57.