

米散射激光雷达降噪反演算法研究和应用

张猛^{1,2}, 张晓莉³, 金钊², 刘洋^{2,4}, 胡源^{1*}¹中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;²合肥中科环境监测技术国家工程实验室有限公司, 安徽 合肥 230088;³安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230039;⁴中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 针对激光雷达信号中含有的噪声,提出一种将数据分区使用小波包变换分解和重构算法的信号降噪方法,该方法能为下一级消光系数反演提供高质量数据。为了验证该方法的有效性,比较雷达原始数据、小波包处理后反演的消光系数、分区小波包处理后反演的消光系数的差异,并进一步使用Bump、Block测试信号进行数值模拟,定量分析了分区小波包算法的去噪效果。分区小波包算法处理的Bump、Block测试信号评价函数的均方误差(MSE)和R值均优于一般小波包结果。结果表明,分区小波包降噪方法能通过降噪改善下一级反演消光系数结果,有效保护低空的激光雷达消光廓线的细节结构并抑制高空的信号噪声。空气气溶胶消光系数随时间和空间变化的伪彩图表明了所提方法的可行性和实用性。

关键词 信号; 小波变换; 降噪; 消光系数

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223031

Research and Application of Denoising Algorithm for Mie Lidar Signal

Zhang Meng^{1,2}, Zhang Xiaoli³, Jin Zhao², Liu Yang^{2,4}, Hu Yuan^{1*}¹State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;²Hefei Zhongke Environmental Monitoring Technology National Engineering Laboratory Co., Ltd., Hefei 230088, Anhui, China;³Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230039, Anhui, China;⁴Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract In this paper, to manage the lidar signal noise, an effective denoising method of wavelet packet transform decomposition and reconstruction based on data segmentation is proposed. This can provide high-quality data for extinction coefficient retrieval. Herein, to verify the proposed denoising method feasibility, the differences between the original radar data, the extinction coefficient retrieved after wavelet packet processing, and the extinction coefficient retrieved after segmented wavelet packet processing were compared. In the numerical simulation using Bump and Block test signals, the value of mean square error (MSE) and R of the wavelet packet algorithm based on data segmentation was found to be better than that of the other wavelet packet algorithms. The corresponding experimental result indicates that the segmented wavelet packet denoising method can improve the results of the next-level inversion extinction coefficient via denoising, effectively protect the detailed structure of the low-altitude lidar extinction profile, and suppress the noise at high altitudes. Furthermore, the changing of the extinction coefficient pseudo-color image of air aerosol with time and space shows the feasibility and usefulness of the proposed method.

Key words signal; wavelet transform; de-noising; extinction coefficient

1 引言

大气气溶胶指悬浮在大气中的固体、液体及大气

介质所组成的多相系统。大气气溶胶的特性包括物理特性和化学特性,物理特性包括动力学直径分布、能见度、质量浓度等,化学特性包括组成成分、多相反应等。

收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2022-11-24; 录用日期: 2022-12-07; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(51991352)、合肥市蜀山区环境监测仪器与应急处理设备重大新兴产业专项

通信作者: *yuanhu@ustc.edu.cn

大气气溶胶对大气环境和人类健康有着非常重要的影响,在一些应急突发事件中,也常常被人关注,因此一直是科学领域的研究热点^[1-4]。

激光雷达^[5-6]是传统雷达技术与激光技术相结合的产物,具有全天候、非接触、探测范围广、立体探测等特点,在大气气溶胶的探测研究中有着广泛的应用。激光与大气气溶胶相互作用后产生后向散射信号,激光雷达通过利用后向散射信号来探测气溶胶特性,如气溶胶消光系数、后向散射系数、特定温度、湿度、气体浓度分布等相关物理量。激光雷达网络不仅可以监测环境空气,而且可以追踪陆表野火、森林火所产生的污染物(尤其是颗粒物浓度等),评估区域环境以便进行应急处理。米散射激光雷达具有结构简洁、回波信号强等优点,在气溶胶探测中有着广泛的应用。激光雷达回波信号强度作为反演各种参数的基准,受天空背景光和光电探测器的暗电流影响,并且与探测距离的平方成反比。为了获取激光雷达降噪后的有用信号,经验模式分解(EMD)、平均值滤波、中间值滤波等方法^[1,7]被应用在雷达回波信号的处理上,但是很多文献只是对特定的回波曲线进行了分析和处理,并未对一段时间内的雷达探测数据进行分析 and 展示^[1,7-8]。小波包变换^[4]具有良好的时频局域性,可以实现对信号不同频率成分的分解,为信号滤波、信噪分离和强噪声背景下微弱信号的特征提取提供了有效方法,但小波包分解和重构可能会导致部分信号信息的丢失^[8-9]。

为了更好地反演计算气溶胶的消光系数,本文提出了一种利用雷达回波信号噪声比值对雷达回波信号进行分区,然后使用小波包分解和重构算法处理雷达回波信号数据的方法。数据反演的消光系数表明,分区方法中不同层级的近似重构不仅避免了消光系数的部分细节信息丢失,同时有效抑制了高空噪声对反演消光系数的影响。对米散射激光雷达系统采集的连续数天的数据进行了处理,并将其转换成更直观的颗粒物消光系数时空分布伪彩图,结果表明了所提方法的可行性、稳定性和实用性。

2 激光雷达工作原理

雷达方程^[8,10]可以表示为

$$P(z) = P_0 \frac{c\tau_p A}{2z^2} \beta(z) e^{-2 \int_0^z \sigma(z') dz'}, \quad (1)$$

式中: $P(z)$ 是高度 z 处的雷达回波信号强度; P_0 为激光脉冲的峰值功率; c 为光速; τ_p 为激光脉冲宽度; A 是雷达常数; β 和 σ 分别为后向散射系数和消光系数。

激光雷达信号是一系列的离散数据信息,数据的采样间隔为 Δz ,因此激光雷达的第 n 个采样时间的采集信号的激光雷达方程可以表示为

$$P(n) = P_0 \frac{c\tau_p A}{2(n \cdot \Delta z)^2} \beta(n \cdot \Delta z) e^{-2 \left[\sum_{j=0}^{n-1} \sigma(j) \Delta z \right]}. \quad (2)$$

天空的背景散射和探测器的暗电流是激光雷达信号的主要噪声,包含噪声信号的激光雷达回波信号可以表示为

$$x(n) = p(n) + d(n) + b(n), \quad (3)$$

式中: $x(n)$ 为雷达信号探测值; $p(n)$ 为真实的雷达信号值; $d(n)$ 为探测器电子噪声值; $b(n)$ 为天空的背景散射值。采用接收到的雷达信号强度与噪声强度的比值作为判据,假设到达一定高度后,回波信号中只含有噪声信号,不含其他信号,将此区间一段时间的回波信号平均值作为噪声基准值,后续计算取高度14~14.9 km。

3 算法基本原理

任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_k f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (4)$$

可以看出 $f(t)$ 的连续小波包变换结果相当于信号 $f(t)$ 通过单位冲击响应为 $|a|^{-1/2} \psi\left(\frac{-t}{a}\right)$ 的系统的输出。因此可知, $f(t)$ 的连续小波包变换结果就是一系列带通滤波器对 $f(t)$ 进行滤波后的输出。伸缩因子 a 变化,带通滤波器的带宽和中心频率也随之发生变化,伸缩因子 a 小,中心频率大,带宽变宽。 $f(t)$ 通过带通滤波器后对分析信号具有重要价值,通过变换不同的基函数可以实现对高低频成分的分解和重构。

假设激光雷达回波信号为 $x(n) = p(n) + d(n) + b(n)$,设 $\{h_n\}_{n \in \mathbf{Z}}$ 是正交的尺度函数 $\varphi(t)$ 对应的正交低通实数滤波器, $\{g_n\}_{n \in \mathbf{Z}}$ 是正交小波包函数 $\psi(t)$ 的高通滤波器,其中 g_n 和 h_n 满足正交关系 $g(k) = (-1)^k h(1-k)$,递归函数 μ_n 称为正交尺度函数确定的小波包^[11-12],有

$$\begin{cases} \mu_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_k \mu_n(2t-k), \\ \mu_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_k \mu_n(2t-k), \end{cases} \quad (n=1, 2, 3, \dots). \quad (5)$$

对于任意非负整数 $n \in \mathbf{Z}^+$,存在 $U_{j+1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}$, $j \in \mathbf{Z}$ 。将 Mallat 多分辨分析算法中的正交小波包分解算法推广到小波包包分解算法,则得到的小波包包快速分解和重构公式为

$$\begin{cases} d_j^{2n}(k) = \sum_{l \in \mathbf{Z}} h_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \\ d_j^{2n+1}(k) = \sum_{l \in \mathbf{Z}} g_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \\ d_{j+1}^n(k) = \sum_{l \in \mathbf{Z}} h_{k-2l} d_j^{2n}[l] + \sum_{l \in \mathbf{Z}} g_{k-2l} d_j^{2n+1}[l] \end{cases}, \quad (6)$$

式中:系数 d_j^{2n} 和 d_j^{2n+1} 分别为尺度 2^j 下的一个逼近函数在子空间 U_j^{2n} 和 U_j^{2n+1} 上的投影。所以小波包包分解可实现对信号低频成分的分解,而且对高频成分同样可以分解。

4 实验结果计算和分析

4.1 传统小波包分解和重构结果

为了验证所提算法的有效性,利用自主研发的雷达系统在合肥市(117.159259° E, 31.871073° N)进行了实验探测与数据采集,采集时间为2021-03-05—03-08,激光雷达系统的数据采集频率是20 MHz,对应的采样空间间隔 Δz 为7.5 m^[13]。

如图1所示,选取几个测试时刻获得的测试数据,几个时刻记为20210305T192531、20210306T022505、20210307T033237、20210308T014010,后续各图中编号与此对应。数据处理时采用的小波包函数为db6,选取的分解层数为3,利用3层近似重构对数据进行处理。从图1可以看出:高空噪声占比大时,3层近似重构方法可以有效地去除雷达回波信号中的噪声;低空噪声占比大时,反演的气溶胶的消光系数在峰值附近会出现信号

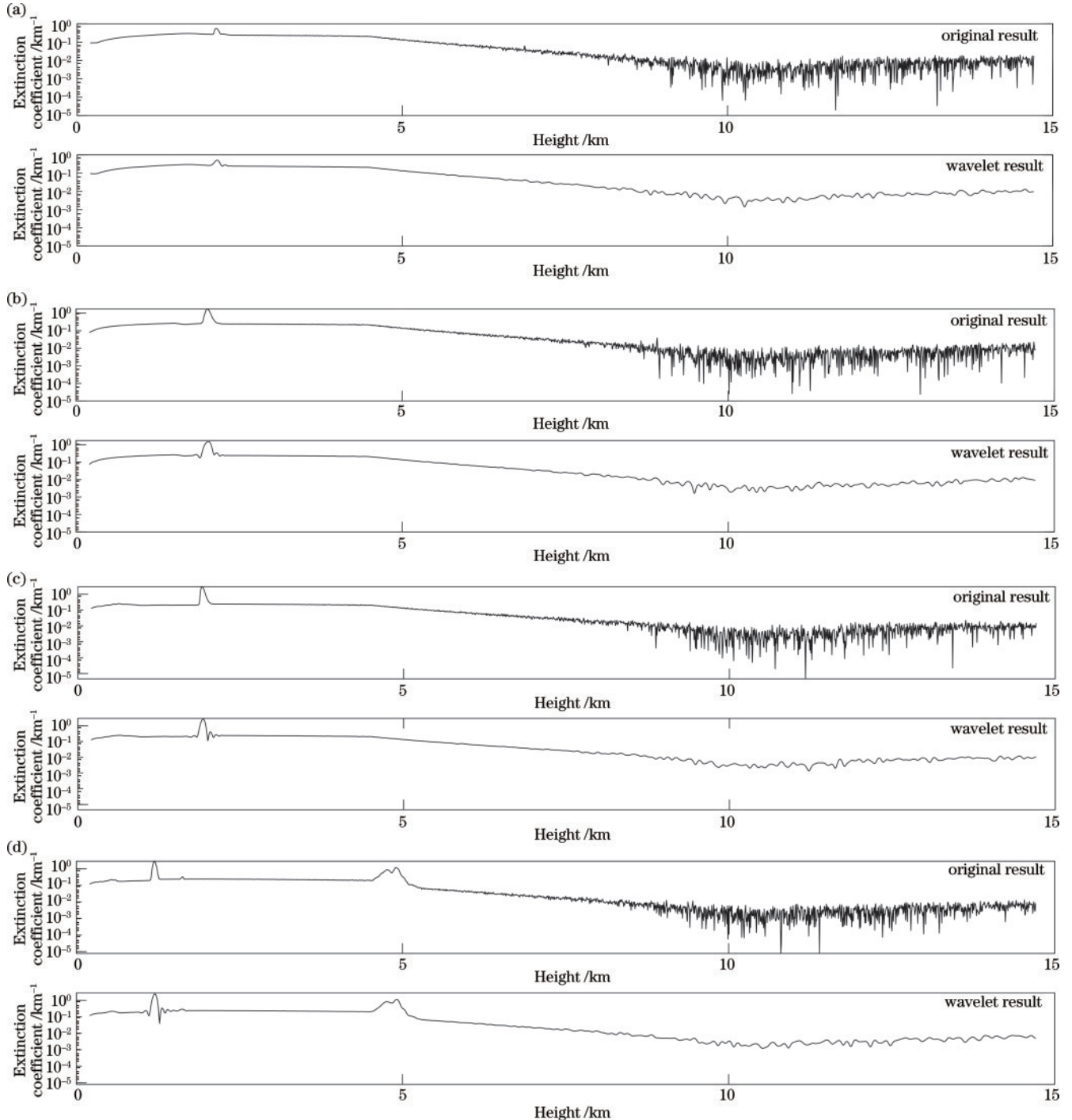


图1 小波包三层近似重构处理前后计算的消光系数。(a)20210305T192531;(b)20210306T022505;(c)20210307T033237;(d)20210308T014010

Fig. 1 Extinction coefficient calculated before and after wavelet packet three-layer approximate reconstruction. (a) 20210305T192531; (b) 20210306T022505; (c) 20210307T033237; (d) 20210308T014010

失真,导致细节信息损失;几乎所有的峰值在经过小波包处理后都有一定程度的损失;从图 1(b)~(d)可以看出,当峰值锐利时,幅值损失更为突出,甚至在信号峰的两侧还出现了额外的纹波峰,和文献[8-9]中的失真一致。

基于小波包重构的原理,针对消光系数由于重构层数过高时出现纹波峰的现象,在数据处理过程中尝试降低算法的重构层级,采用小波包函数 db6,选用分

解层数为 1,数据处理结果如图 2 所示。不难发现,与 3 层近似重构相比,1 层近似重构能够有效避免反演出的消光系数廓线峰出现纹波峰的现象,但是高空噪声抑制效果不理想。

4.2 分区小波包分解和重构结果

气溶胶主要来源于地球上人类活动、各种生物活动及其他活动,高空中的气溶胶随着气流的输运呈现扩散和衰弱的现象。如图 3 所示,高度 5 km 以下,激

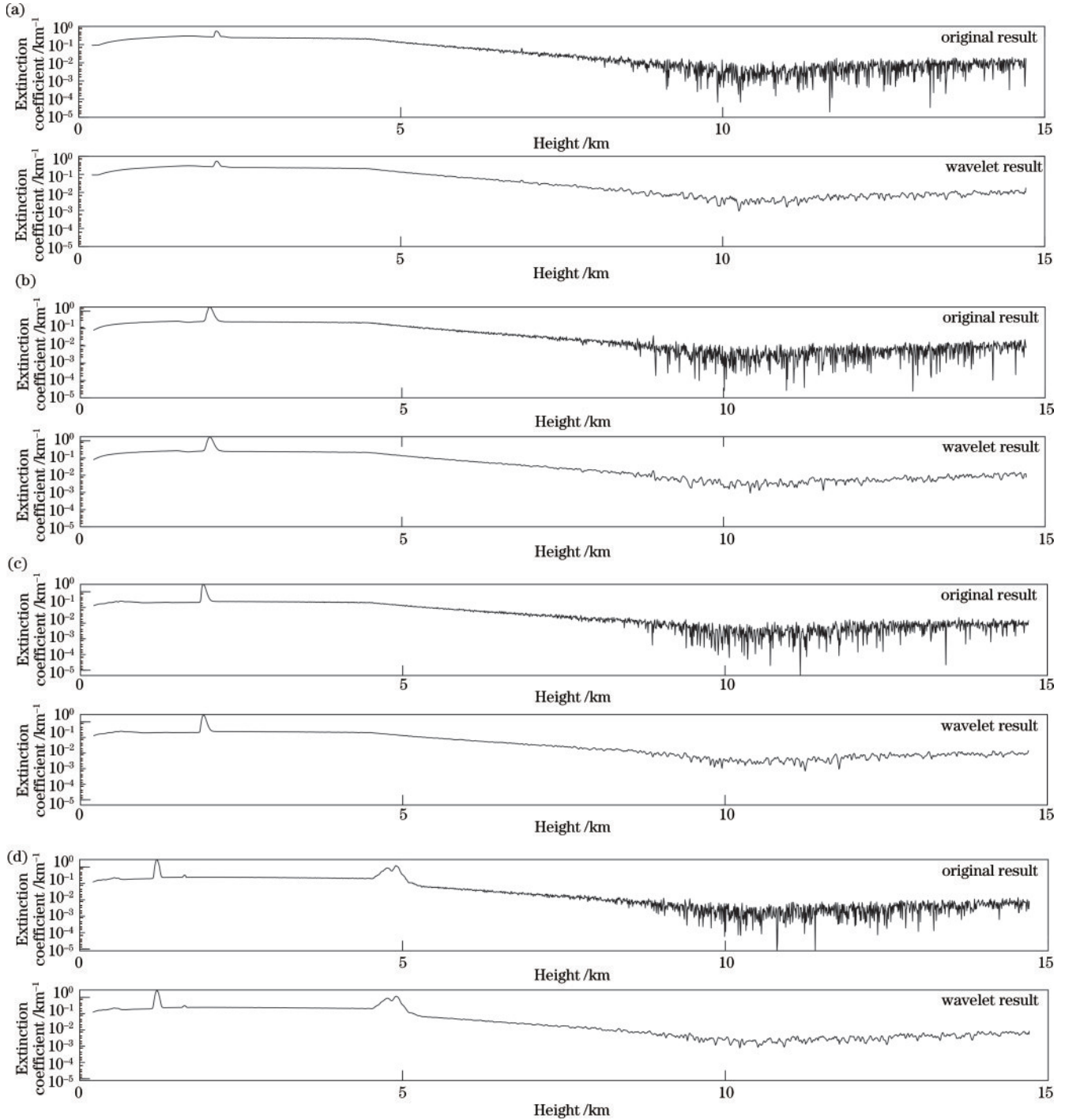


图 2 小波包一层近似重构处理前后计算的消光系数。(a)20210305T192531;(b)20210306T022505;(c)20210307T033237;(d)20210308T014010

Fig. 2 Extinction coefficient calculated before and after wavelet packet one-layer approximate reconstruction. (a) 20210305T192531; (b) 20210306T022505; (c) 20210307T033237; (d) 20210308T014010

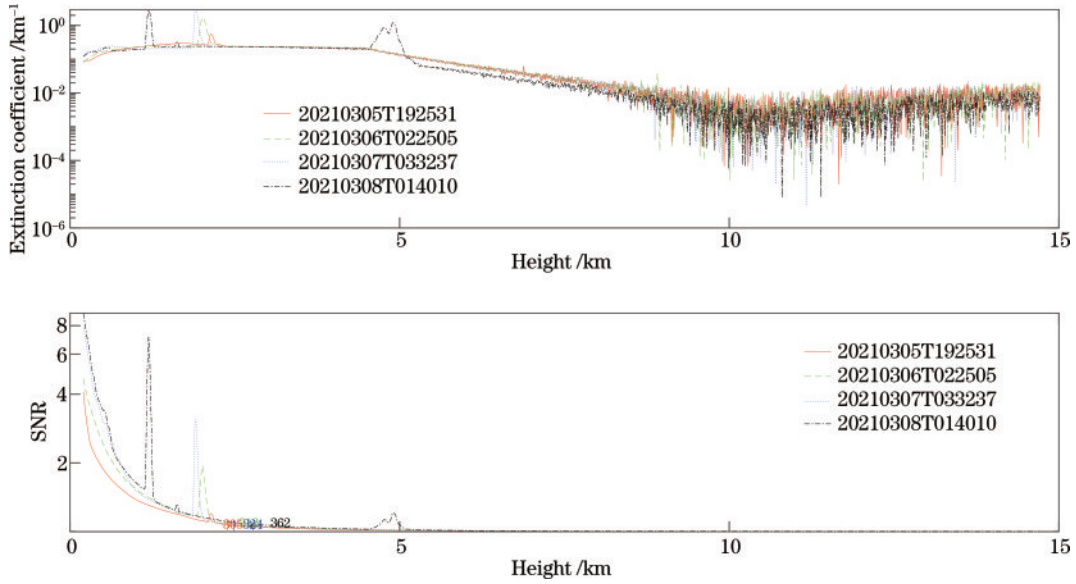


图 3 原始数据的反演消光系数和 SNR 随高度的变化

Fig. 3 Retrieved extinction coefficient of the original data and variation of SNR with height

光回波信号强,雷达回波信噪比(SNR)随着高度增加呈单调下降趋势;高空范围,高空消光系数廓线较为平缓,信号值波动相对较大,这是因为激光雷达回波信号噪声占主要地位,激光雷达回波信号与 z^2 成反比,随着激光雷达探测高度增加,信号强度会迅速下降,导致反演的消光系数噪声也比较大。采用 SNR 作为判据,根据噪声和真实的雷达信号之间的竞争关系,对雷达数据进行分区处理,具体措施为根据 SNR 的临界值 R_{SN0} (本文取 1.08),将雷达信号分为高空和 low 两个不同区间。对于 $R_{SN} \geq R_{SN0}$ 的区段,信号强度高,反演的消光系数稳定性好,对这一区间,对雷达回波信号数据使用一层近似重构计算消光系数,避免反演的雷达消光系数在峰值处丢失细节峰或者增加纹波峰的现象;对于 $R_{SN} < R_{SN0}$ 的区段,这段数据处于高空,噪声占主导地位,信号波动较大,如果降噪处理不充分,将会导致反演的消光系数波动较大,甚至出现错误数据,对这部分数据采用三层小波包近似重构进行数据预处理,再计算消光系数,反演效果更好。从表 1 可以看出,分割

表 1 依据 SNR 的数据分区情况

Table 1 Data partitions based on SNR

| Time | Number of sections | Corresponding height of the critical point / m |
|-----------------|--------------------|--|
| 20210305T192531 | 2 | 2287.5 |
| 20210306T022505 | 2 | 2340 |
| 20210307T033237 | 2 | 2430 |
| 20210308T014010 | 2 | 2715 |

点高度比较接近,说明激光雷达系统和周围环境处于相对比较稳定的状态,同时也说明了分区数据处理的合理性和可操作性。

采用所提分区小波包处理算法对实验探测期间的激光雷达回波信号进行处理,反演计算的大气气溶胶消光系数如图 4 所示。与图 1、图 2 和图 3 进行对比分析,可以看出,将高度方向的数据分为两个区间后,所提应用数据分区小波包变换分解和重构的方法可以提高低空部分大气气溶胶反演消光系数的精准性,同时也有效地抑制了高空噪声。

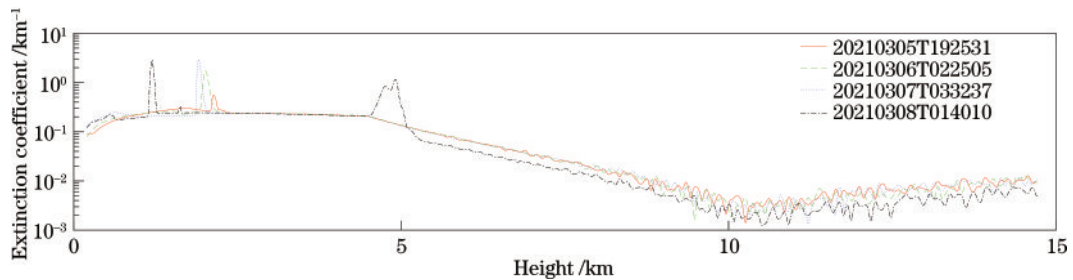


图 4 分区小波包处理后的雷达回波信号的反演消光系数

Fig. 4 Retrieved extinction coefficient of the radar echo signal processed by segmented wavelet packet

4.3 数值模拟结果

为了定量分析所提算法降噪的有效性,选择

Bump 和 Block 测试信号^[1],构造模拟数据 $f(n)$ 并对其叠加一定信噪比的高斯白噪声,分别对这两个测试信

号使用所提算法和传统的小波包算法进行处理,分析分段处理方法的优劣。

$$f(n) = \begin{cases} 2 + a \text{ or } 2 + b, & n \leq 512 \\ 1, & n > 512 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: a 为 Bump 测试信号; b 为 Block 测试信号。叠加的噪声信号是均值为 1、标准方差平方为 $\sigma=0.52$ 的白噪声。如式(7),构造原始数据 $f(n)$ 和雷达数据长度一致,分为两个数据分区。前段数据为 Bump 测试信号或者 Block 测试信号加上数值 2 的结果,叠加噪声后为信噪比高的数据区段;后端数据均取值 1,叠加噪声后为信噪比低的数据区段。对滤波效果进行评价的参数均方误差(MSE)和信号噪声比(SNR)分别为

$$E_{MS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [f(n) - f'(n)]^2, \quad (8)$$

$$R = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^N f^2(n)}{\sum_{n=1}^N [f(n) - f'(n)]^2}, \quad (9)$$

式中: $f(n)$ 为真实信号, $f'(n)$ 为去噪信号。不难看出 MSE 反映真实值和滤波值的相似程度,越小相似程度越高;R 值反映感知质量,越大越好^[1]。为了方便比较数据结果,统一采用小波包函数 db6,选用分解层数为 3。传统不分区小波包处理的 1 层和 3 层近似重构结果分别如图 5(c)、图 5(d)和图 6(c)、图 6(d)所示;前段数据使用 1 层重构、后段数据采用 3 层重构的分段小波处

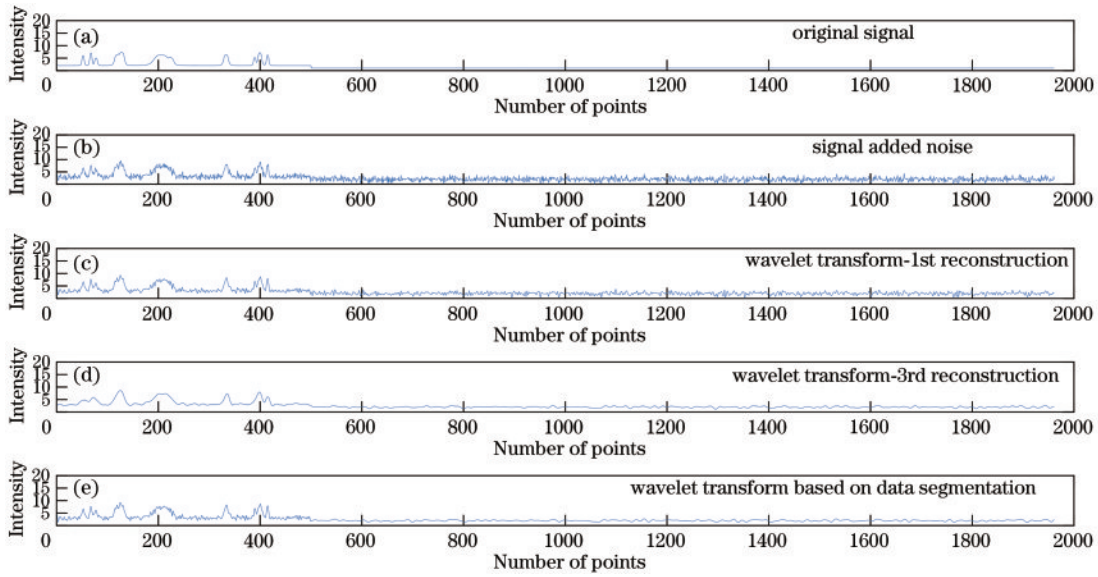


图 5 小波包和分段小波包对 Bump 含噪信号处理的结果

Fig. 5 Results of Bump noisy signal processed by wavelet packet and segmented wavelet packet

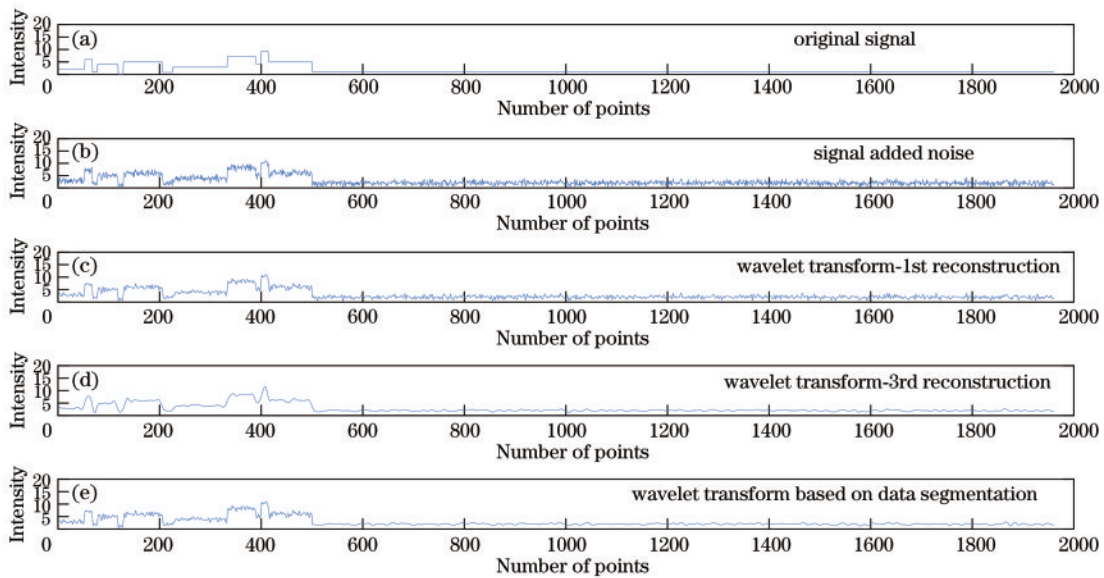


图 6 小波包和分段小波包对 Block 含噪信号处理的结果

Fig. 6 Results of Block noisy signal processed by wavelet packet and segmented wavelet packet

理结果如图 5(e)和图 6(e)所示。对于 Bump 测试信号构造的数据的 MSE 和 R 值,小波包处理 1 层和 3 层重构结果分别为 1.2664 和 4.5166、1.1270 和 4.5474,分段小波包处理结果分别为 1.1124 和 5.0231;对于 Block 测试信号构造的数据的 MSE 和 R 值,小波包处理 1 层和 3 层重构结果分别为 1.2674 和 6.9097、1.1296 和 7.1637,分段小波包处理结果分别为 1.1220 和 7.4402。综上所述,分区后不同区域内信号和噪声的竞争情况不同,设置不同的滤波参数,相比不分区的小波处理方法,所提分段小波包处理方法降噪效果良好。

为了验证去噪后的数据对下一级气溶胶消光系数反演的改善效果,激光雷达系统进行了连续数天的实验,将其反演的气溶胶消光系数时空分布以伪彩图的形式展现,如图 7 所示。从图 7 可以看出,相比于原始数据的反演结果,对于图 7(b),未分区小波包算法虽然抑制了高空噪声,但是低空区域消光系数失真,出现条带拓宽和纹波现象,对于图 7(c),分区方法通过在高低空设置不同的小波参数,能够兼顾高低空结果,在信噪比高的低空有效信号没有失真,反演高空的消光系数噪声明显被抑制。在低空区域,可以通过消光系数

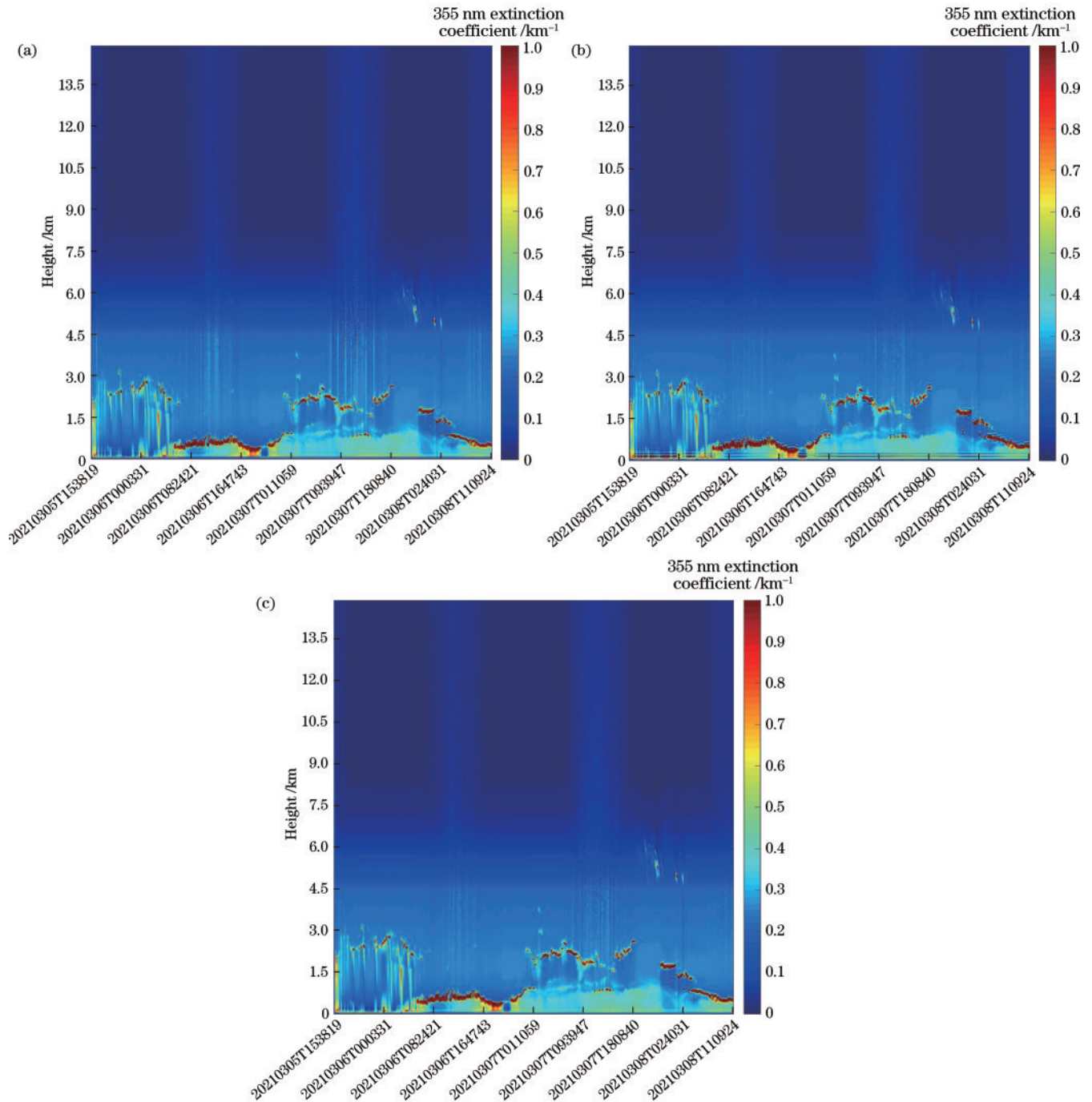


图 7 反演的消光系数的时空分布伪彩图。(a)原始图;(b)小波包算法;(c)分区小波包算法

Fig. 7 Pseudo-color maps of spatio-temporal distribution of the retrieved extinction coefficient. (a) Original image; (b) wavelet packet algorithm; (c) segmented wavelet packet algorithm

伪彩图观察到气溶胶集中、扩散及输运情况,说明所提算法对气溶胶消光系数的反演效果有提升,伪彩图亦能够很好地展示这种效果;在高空区域,可以看出所提算法对反演消光系数噪声抑制效果明显,尤其在 3 月 7 日 18:08 至 3 月 8 日 2:40 期间,在 4.5~6 km 高空有更为明显的消光系数细节变化,也是分区小波包算法优势的体现,其中 3 月 6 日和 3 月 7 日 8:00 至 17:00 左右的轻微的竖向等宽条纹是日光噪声强度比夜间更强导致的,这种细微差异的存在说明高空噪声被有效抑制,但并没有丢失信息的真实性。从图 7 还可以看到红色示意的边界层高度变化,3 月 5 日边界层在 2.2 km 高度附近,3 月 6 日 6:00 左右开始,边界层明显降低至 375 m 左右,之后在 3 月 7 日 1:00 后,边界层又开始升高至 2 km 左右,说明伪彩图能更方便分析和展示数据。

5 结 论

针对激光雷达信号中含有的噪声,利用数据分区,使用小波包变换分解和重构算法对激光雷达的信号进行降噪,该算法能够为下一级反演消光系数提供高质量数据。为了验证该方法的有效性,比较了未经小波包处理、小波包处理、分区小波包处理的信号数据反演的消光系数的差异。对于 Bump 测试信号构造的数据的 MSE 和 R 值,小波包处理 1 层和 3 层重构结果分别为 1.2664 和 4.5166、1.1270 和 4.5474,分区小波包处理结果分别为 1.1124 和 5.0231;对于 Block 测试信号构造的数据的 MSE 和 R 值,小波包处理 1 层和 3 层重构结果分别为 1.2674 和 6.9097、1.1296 和 7.1637,分区小波包处理结果分别为 1.1220 和 7.4402。计算结果表明,所提方法能有效保护激光雷达消光廓线的细节结构,并有效降低了高空的消光系数廓线的波动。同时,利用自主研发的雷达系统进行了长时间的实验探测和数据采集,利用分区小波包算法对其进行处理,得到了直观展示空气气溶胶消光系数随时间和空间变化的伪彩图,验证了雷达系统和所提算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 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.
Zheng F T, Hua D X, Zhou A W. Empirical mode decomposition algorithm research and application of Mie lidar atmospheric backscattering signal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1068-1074.
- [2] 季承荔, 周军. 机载激光雷达信号 Fernald 前向反演的一种新定标方法[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2051-2058.
Ji C L, Zhou J. New calibration method for Fernald forward inversion of airborne lidar signals[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2051-2058.
- [3] 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.
Liu J. The study of the lidar techniques for remote

- sensing of the atmospheric temperature and aerosol profiles[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [4] 赵培涛, 李伟, 张寅超, 等. 振动拉曼散射信号反演激光雷达几何因子分析[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1938-1944.
Zhao P T, Li W, Zhang Y C, et al. Determination of the lidar geometric form factor with vibration Raman scattering signals[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 1938-1944.
- [5] 刘秋武, 陈亚峰, 王杰, 等. 差分吸收 NO₂ 激光雷达波长漂移和能量波动对浓度反演的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 253-260.
Liu Q W, Chen Y F, Wang J, et al. Effects of wavelength shift and energy fluctuation on the inversion of NO₂ differential absorption lidar[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 253-260.
- [6] 赵志龙, 吴谨, 王海涛, 等. 微弱回波条件下差分合成孔径激光雷达成像实验演示[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 276-283.
Zhao Z L, Wu J, Wang H T, et al. Experimental demonstration of differential synthetic aperture lidar imaging at a very low return level[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 276-283.
- [7] 尹祺巍, 刘智深, 刘秉义, 等. 多普勒激光雷达运动测风数据降噪处理[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(4): 260-267.
Yin Q W, Liu Z S, Liu B Y, et al. Denoising processing of Doppler wind lidar data in moving measurement[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(4): 260-267.
- [8] Song Y H, Zhou Y D, Liu P B, et al. Research on an adaptive filter for the Mie lidar signal[J]. Applied Optics, 2019, 58(1): 62-68.
- [9] 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.
Mao J D, Hua D X, Wang Y F, et al. Noise reduction in the lidar signals based on wavelet packet analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 0209001.
- [10] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Sun Y K. Wavelet analysis and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [11] 王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328004.
Wang Y F, Gao F, Zhu C X, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity, and aerosols up to troposphere height[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328004.
- [12] 郑海波. 非平稳非高斯信号特征提取与故障诊断技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
Zheng H B. Feature extraction and fault diagnosis of non-stationary and non-Gauss mechanical vibration signals [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002.
- [13] 毛建东, 华灯鑫, 何廷尧, 等. 银川上空大气气溶胶光学特性激光雷达探测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 2006-2010.
Mao J D, Hua D X, He T Y, et al. Lidar observations of atmospheric aerosol optical properties over the Yinchuan area[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(7): 2006-2010.