

基于小波包分析的激光雷达信号消噪算法的研究

毛建东¹ 华灯鑫² 王玉峰² 汪 丽²

(¹北方民族大学电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021
²西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 针对激光雷达回波信号所含噪声的特点, 提出并详细论述了一种能够对激光雷达回波信号进行有效消噪的小波包平均阈值变换方法。该方法通过求取最优小波包基的每个结点的阈值, 并进行平均后作为全局阈值来实现小波包消噪。为了验证该方法的有效性, 对包含高斯白噪声的模拟信号进行了仿真消噪, 并对米氏散射激光雷达系统实际探测得到的大气回波信号进行了消噪处理。同时, 将该方法与小波全局阈值消噪、小波包默认阈值的消噪效果进行了对比分析。仿真结果和实验结果表明, 基于平均阈值的小波包消噪方法能够有效降低激光雷达回波信号中所含噪声, 并且其消噪效果明显优于另外两种小波分析方法。

关键词 信号处理; 激光雷达; 小波包分析; 消噪; 消光系数

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0209001

Noise Reduction in Lidar Signal Based on Wavelet Packet Analysis

Mao Jiandong¹ Hua Dengxin² Wang Yufeng² Wang Li²

(¹ School of Electrical and Information Engineering, Beifang University of Nationalities,
Yinchuan, Ningxia 750021, China
² School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract According to the characteristic of lidar-return noise, an effective de-noising method of wavelet packet based on average threshold is presented and described to reduce the lidar-return noise. In the method, the thresholds of every node of the best wavelet packet basis are acquired and averaged, and then the average value is used as a global threshold to quantize the decomposition coefficient of every node. To verify the feasibility of the de-noising method, some numerical simulations are carried out to reduce the Gauss white noise of the simulated signal, and also, the Mie lidar returns contaminated by noise are de-noised by the method. Moreover, the comparisons among the wavelet packet transform based on average threshold, wavelet transform based on global threshold and the wavelet packet transform based on default threshold are performed. Experiment results show that the method of wavelet packet based on average threshold is capable of effectively reducing the lidar return noise and the de-noising effect is better than other two methods.

Key words signal processing; lidar; wavelet packet analysis; de-noising; extinction coefficient

OCIS codes 010.3640; 010.3640; 070.2615

1 引 言

激光雷达是近几十年来快速发展的一种全新探测技术, 是现代雷达探测技术从厘米波、毫米波向光波探测技术的延伸, 实现了遥感探测技术向高时空分辨率、高精度领域发展^[1~4]。但是, 在大气探测

中, 激光雷达这种新型光电传感探测方式属于强噪声背景下微弱信号提取的范畴, 其接收的大气回波信号往往非常微弱, 并且随着探测高度的增加, 回波信号强度以高度平方的倒数递减; 同时, 由于光电探测器件产生的暗电流、信号处理电路中元件产生的

收稿日期: 2010-08-25; **收到修改稿日期**: 2010-10-08

基金项目: 国家 973 计划(2009CB426302)、国家自然科学基金(40675015)和宁夏高等学校科学研究项目(2007JY006)资助课题。

作者简介: 毛建东(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光雷达技术方面的研究。E-mail: mao_jiandong@163.com

热噪声以及天空背景光等杂散光均使得激光雷达的远场数据很容易淹没在噪声之中^[5]。

随着激光技术、光电探测技术和数据采集技术的发展,这一问题得到了一定程度的解决。在传统信号的数据处理方法中,傅里叶滤波技术被广泛用于信号去噪,这种方法根据有用信号的频率低于噪声频率的原理来分离有用信号,但是由于激光雷达信号具有非线性和非平稳的特征,其包含噪声以白噪声为主,而且频率变化范围并不固定,即包含了随距离变化的各种频率,因此设置一个截止频率将会引起有用信号的失真,消噪效果并不理想^[6]。此外,蒙特-卡洛滑动平均窗口法也常用于激光雷达信号的消噪,但是,这种方法是牺牲空间信号分辨率为代价的。目前,由于小波分析良好的时频局部性,通过小波变换可以对信号的不同频率成分进行分解,为信号滤波、信噪分离和强噪声背景下微弱信号特征的提取提供了有效途径^[7]。常用的小波信噪分离算法有小波分解与重构法、非线性小波变换阈值法、平移不变量小波法以及小波变换模极大值法等^[8]。2004年,方海涛等^[9]利用小波阈值法对激光雷达信号进行消噪,增加了激光雷达的有效探测距离;2006年,尹世荣等^[10]联合小波改进阈值和小波域空间滤波的方法对一台CO₂差分吸收激光雷达进行消噪,并进行了仿真。但是,通常小波变换只能对信号的低频部分进行进一步的分解,而不能对高频部分继续分解,因此,不能同时满足高的时间分辨率和频率分辨率。而Coifman, Wickerhanser等提出的小波包分析则可以对小波分析不能分解的高频部分做进一步分解,使得小波包具有更好的时频分析能力,从而能够提供一种更加精确的信号消噪方法^[11]。

本文根据激光雷达回波信号的噪声是白噪声的特点,提出一种小波包平均阈值变换方法,分别对仿真信号和西安理工大学自行研制的米氏散射激光雷达实际探测得到的大气回波信号数据进行消噪处理,实现强噪声背景下激光雷达微弱信号的精细提取,并将该方法与其他方法进行了对比,证明了本方法的可行性与实用性。

2 激光雷达系统方程

对于大气探测激光雷达系统而言,其探测得到的回波信号可以用激光雷达方程描述^[12]

$$P(z) = P_0 C z^{-2} [\beta_M(z) + \beta_A(z)] \times \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha_M(z') + \alpha_A(z')] dz'\right\}, \quad (1)$$

式中 $P(z)$ 是距离 z 处的激光回波信号功率; P_0 是激光发射功率; C 是系统标定常数,包括发射、接收系统的光学损失,接收系统的有效接收面积等系统常数; $\beta_M(z), \beta_A(z)$ 分别是距离 z 处的大气分子、气溶胶后向散射系数; $\alpha_M(z), \alpha_A(z)$ 分别是距离 z 处大气分子、气溶胶消光系数。

由于(1)式中包含的气溶胶消光系数和后向散射系数是未知量,因此,需要假设气溶胶消光系数与后向散射系数之间的比值(即激光雷达比)。在米氏散射激光雷达中,利用接收到的米氏-瑞利散射回波信号反演气溶胶消光系数时,常用的算法有Collis斜率法^[13], Klett法^[12]及Fernald法^[14]等。

3 小波包消噪算法原理

为了简化问题而又不失一般性,考虑到所采集的回波信号中包含噪声信号,且其具有统计特性,并考虑所测量的回波信号的数据为时间上离散的数据,因此,对回波信号建立方程^[15]

$$s(t) = f(t) + \sigma \cdot e(t), \quad (2)$$

式中 $s(t)$ 为激光雷达探测的回波信号的测量值, $f(t)$ 为回波信号真值, $e(t)$ 为独立的服从正态分布的白噪声,即误差项。

设 $\{h_n\}_{n \in Z}$ 是正交尺度函数 $\Phi(t)$ 对应的正交低通实数滤波器, $\{g_n\}_{n \in Z}$ 是正交小波函数 $\Psi(t)$ 对应的高通滤波器,其中 $g_n = (-1)^n h_{1-n}$, 即两系数满足正交关系,则递归定义的函数 μ_n 称为正交尺度函数 $\mu_0 = \Phi$ 确定的小波包^[11,16], 有

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

因此,对于任意非负整数 $n \in Z_+$, 存在

$$U_{j+1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}, \quad (j \in Z) \quad (4)$$

将Mallat多分辨分析算法中的正交小波分解算法推广到小波包分解算法,则得到的小波包快速分解和重构公式为

$$\begin{cases} d_j^{2n}(k) = \sum_{l \in Z} h_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \\ d_j^{2n+1}(k) = \sum_{l \in Z} g_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \end{cases}, \quad (5)$$

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

式中系数 d_j^{2n}, d_j^{2n+1} 分别为尺度 2^j 下的一个逼近函数 $f(t)$ 在子空间 U_j^{2n} 和 U_j^{2n+1} 上的投影。因此,小波

包分解不仅可以对信号的低频成分进行分解,而且可以对高频成分同样进行精细的分解。图1为小波

包分解的示意图^[15],图中A表示低频系数,D表示高频系数,下标的数字表示小波包分解的层次数。

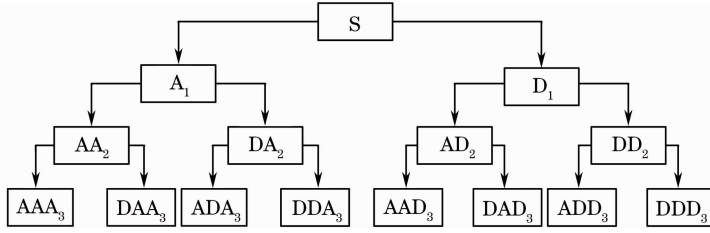


图1 三层小波包分解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-layer wavelet decomposition

从小波库中抽取的能组成 $L^2(R)$ 的一组规范正交基称为小波包基,不同的小波包基具有不同的时频局部化能力,而一个信号的小波包分解可以用很多个小波包基来实现。因此,为了更好地表达信号的特性,需要寻找一个最优小波包基。人们通常定义一个能同时满足“可加性”和“集中度”性质的信息代价函数来选取最优小波基。常用的信息代价函数有 Shannon 熵, l^p 范数 ($1 \leq p \leq 2$), 对数能量熵以及阈值熵等。其中常用的 Shannon 熵的定义为^[15]

$$E(s_i) = - \sum_i s_i^2 \lg(s_i^2), \quad (7)$$

式中约定 $0 \lg(0) = 0$ 。

根据这些信息代价函数,求出使信息代价函数最小的小波包序列,使用自底向顶的快速搜索法,便可以求出最佳小波包基^[11,17]。

在小波分析中,阈值去噪是一种常用的方法,同样,在小波包分析中,也可以利用阈值法对小波包分解的系数进行处理。在实际中,如何选择阈值是算法设计的关键,通常的阈值选择主要根据 Donoho 给出的硬阈值和软阈值两种,其处理方式^[7]

$$WH_j = \begin{cases} \text{sign}(WT_{j,k}) \cdot (|WT_{j,k}| - \mu\lambda) & |WT_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |WT_{j,k}| \leq \lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中 $WT_{j,k}$ 为处理前的小波分解系数, $\text{sign}(\cdot)$ 为取其符号, WH_j 为处理后系数, $1 < j < J$, J 是小波分解的最大层数, λ 为阈值,当 $\mu = 0$, 为硬阈值法;当 $\mu = 1$, 为软阈值法。

通常,阈值选取准则有无偏似然估计、固定阈值准则、混合准则以及极大极小准则等。这里阈值 λ 选取为^[18]

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg(N)}, \quad (9)$$

式中 N 为相应分解层次的高频系数的个数, σ 为噪声标准差,通常,其值为每一层中小波包分解系数

$WT_{j,k}$ 的绝对值的中值除以 0.6745, 其表达式为

$$\sigma = \text{median}(|WT_{j,k}|) / 0.6745, \quad (10)$$

式中 $\text{median}(\cdot)$ 为取中值。此外,应用软阈值消噪时可分为全局阈值消噪和分层独立阈值消噪。全局阈值是指对小波包分解的每一层系数进行处理时,都采用同一个阈值;而分层独立阈值则是指对每一层系数进行处理时,采用不同的阈值。相比较全局阈值,分层独立阈值具有更好的消噪效果。

在利用小波包进行消噪处理时,提出一种利用平均阈值来对激光雷达信号进行提取的方法。该方法首先利用(10)式,求取小波包分解后的每个结点的噪声标准差,并利用(9)式计算每个结点的阈值,然后将所有结点的阈值进行平均后,作为小波包消噪的全局阈值,即

$$\lambda = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sigma_m \sqrt{2 \lg(N_j)}, \quad (11)$$

式中 $1 < m < M$, M 为小波包分解后的所有结点数, $1 < j < J$ 。

因此,对于激光雷达所探测的含噪信号进行精细提取,根据小波包分析法,可以采用以下步骤进行:

- 1) 确定小波包分解的层次 N , 对探测得到的强背景噪声下的激光雷达原始信号进行小波包分解;
- 2) 选择 Shannon 熵这一信息代价函数, 确定最佳正交小波包基;
- 3) 针对最优小波包基的每个结点上的系数, 根据(11)式求取平均阈值, 利用软阈值法进行阈值化处理;
- 4) 对阈值化后的最优小波包基的系数进行重构, 从而实现强噪声背景下微弱激光雷达信号的提取。

4 仿真分析

为了验证平均阈值法消噪的有效性,对包含高

斯白噪声的信号进行了仿真计算,并同时与小波全局阈值消噪、小波包默认阈值消噪效果进行了对比,以比较这几种算法的优劣。

通常,为了评价消噪算法的优劣,可以采用信噪比以及均方误差等指标来进行评价。这两种评价指标分别表示为^[19]

$$R_{\text{SN-out}} = 10 \lg \frac{\sum_{q=1}^Q f^2(q)}{\sum_{q=1}^Q [f'(q) - f(q)]^2}, \quad (12)$$

$$x_{\text{MSE}} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q [f'(q) - f(q)]^2, \quad (13)$$

式中 $f(q)$ 为原始信号, $f'(q)$ 为去噪信号, Q 为信号长度。

由于激光雷达的大气回波信号可以看作是低频信号与高频信号的叠加,其中低频信号的起伏主要由不同高度处的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器件暗电流、电路元件产生的热噪声以及天空背景光等杂散光引起的白噪声信号。因此,采用与米氏散射激光雷达回波信号

的特性类似的仿真信号进行仿真。设 $x(t)$ 为一叠加了高斯白噪声的信号

$$x(t) = -20(t+20)/1500 + 3\sin(2\pi ft) + N(0, \sigma^2), \quad (14)$$

式中 f 为频率,取值为 0.05 Hz, $N(0, \sigma^2)$ 为标准差为 σ 的高斯白噪声。图 2 分别为不含噪声的原始信号、噪声标准差为 $\sigma=2$ 时的含噪信号、小波全局阈值消噪法、小波包默认阈值消噪法以及小波包平均阈值法的消噪效果,这 3 种方法均采用 db5 小波函数进行 3 层分解。此外,为了对比小波全局阈值消噪法与小波包平均阈值法的优劣,将小波全局阈值消噪法的阈值设置成与小波包平均阈值法相同的阈值。可以看出,这 3 种方法在噪声较小时,都可以在一定程度上对噪声进行抑制,其中小波包平均阈值法消噪效果最好,其次为小波全局阈值消噪法,而小波包默认阈值消噪法效果较差。小波包平均阈值法消噪后的信噪比也高于另外 2 种方法,均方误差则小于另外两种方法。

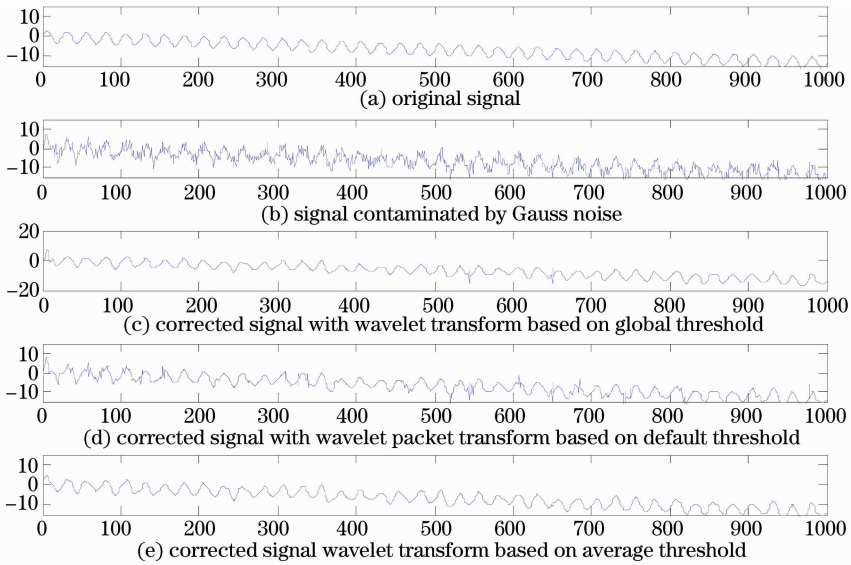


图 2 不同信号(a),(b)以及 3 种不同方法对标准差为 $\sigma=2$ 的含噪信号消噪的效果比较(c)~(e)

Fig. 2 Comparison of two different signals (a), (b) and de-noising effect of three different methods under signal contaminated by Gauss noise with standard deviation $\sigma=2$ (c)~(e)

图 3 分别为不含噪声的原始信号、噪声标准差为 $\sigma=4$ 时的含噪信号、小波全局阈值消噪法、小波包默认阈值消噪法以及小波包平均阈值法的消噪效果。可以看出,随着噪声的增加,小波包默认阈值消噪法的消噪效果明显变差,几乎失去消噪效果,而小波全局阈值消噪法、小波包平均阈值法消噪效果依然较好,明显优于小波包默认阈值消噪法。

此外,为了评价上述 3 种消噪算法的优劣,尤其为了评价同一阈值条件下,小波全局阈值消噪法与小波包平均阈值法的消噪效果,分别计算了上述噪声标准差分别为 2, 4 时两种标准差下的含噪信号消噪后的信噪比(SNR, R_{SN})和均方误差(MSE, x_{MSE}),表 1 为计算结果。可以看出,3 种方法中,无论噪声大小,小波包平均阈值法消噪效果最好,其次是小波

全局阈值消噪法,而小波包默认阈值消噪法效果最差;尤其当噪声标准差较大时($\sigma=4$),小波包平均阈

值法仍然能保持较好的消噪效果,其信噪比明显高于另外两种方法,均方差则明显小于另外两种方法。

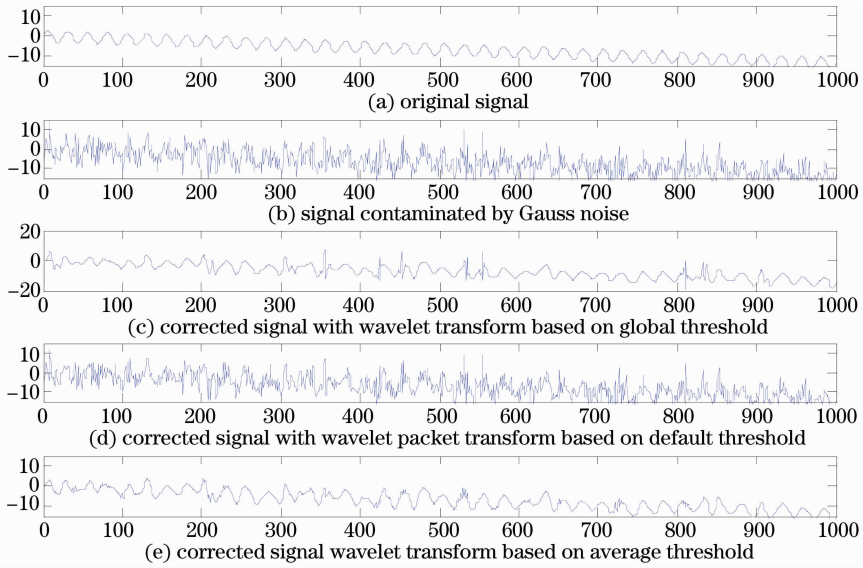


图 3 不同信号(a),(b)以及 3 种不同方法对标准差为 $\sigma=4$ 的含噪信号消噪的效果比较(c)~(e)

Fig. 3 Comparison of two different signals (a), (b) and de-noising effect of three different methods under signal contaminated by Gauss noise with standard deviation $\sigma=4$ (c)~(e)

表 1 使用 3 种方法对不同标准差下的含噪信号进行消噪后的信噪比和均方误差

Table 1 De-noising effect comparison using three methods under different stand deviations

	$\sigma=2$		$\sigma=4$	
	R_{SN}	x_{MSE}	R_{SN}	x_{MSE}
Wavelet transform based on global threshold	18.556	0.94536	11.753	4.5284
Wavelet packet transform based on default threshold	16.397	1.5543	6.8897	13.876
Wavelet packet transform based on average threshold	19.331	0.791	14.314	2.5112

5 激光雷达信号实验结果分析

西安理工大学自行研制了一台小型米氏散射激光雷达系统,并于 2009 年 4 月 1 日至 4 月 10 日,在位于宁夏银川地区的北方民族大学校园内(北纬 $38^{\circ}29'$,东经 $106^{\circ}06'$),对银川地区上空的气溶胶光学特性以及气溶胶的时空变化进行了连续的、系统的观测^[20]。

图 4 为 2009 年 4 月 3 日 01:40 利用小型米氏散射激光雷达实际探测得到的一组仅仅经过 3 个点窗口平滑处理后的距离校正后回波信号的高度廓线。

由图 4 可以看出,在高度 3.5 km 以下,由于近场回波中有用信号较强,其曲线较为平滑,但在高度 3.5 km 以上,由于激光能量的急剧衰减,远场回波中有用信号与噪声信号的强度数量级已经非常接近,因此,信号质量变得非常的差,信噪比极低。

为了验证小波包平均阈值对激光雷达回波信号进行消噪处理、实现强背景噪声下微弱信号精细提

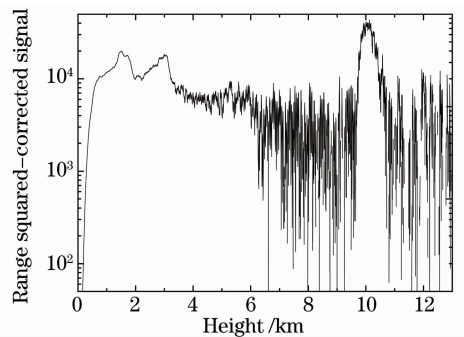


图 4 经过 3 个点的窗口平滑处理后的距离校正后回波信号的高度廓线

Fig. 4 Range-square-corrected signal profile of a Mie lidar which is smoothed with a 3-point-sliding-window

取方法的可行性和有效性,采用多种方法对图 4 所示的回波信号进行了消噪处理。

图 5(a)~(c)所示的廓线为分别使用平滑窗法、小波全局阈值法、小波包默认阈值法以及小波包

平均阈值法进行数据消噪处理后,利用 Klett 法反演所得到的气溶胶消光系数廓线。在 Klett 法中,考虑是背景期,取激光雷达比为 50,并采用美国标

准大气模型计算出大气分子的消光系数、后向散射系数,同时,利用美国标准大气模型计算参考高度处的气溶胶粒子和大气分子的消光系数。

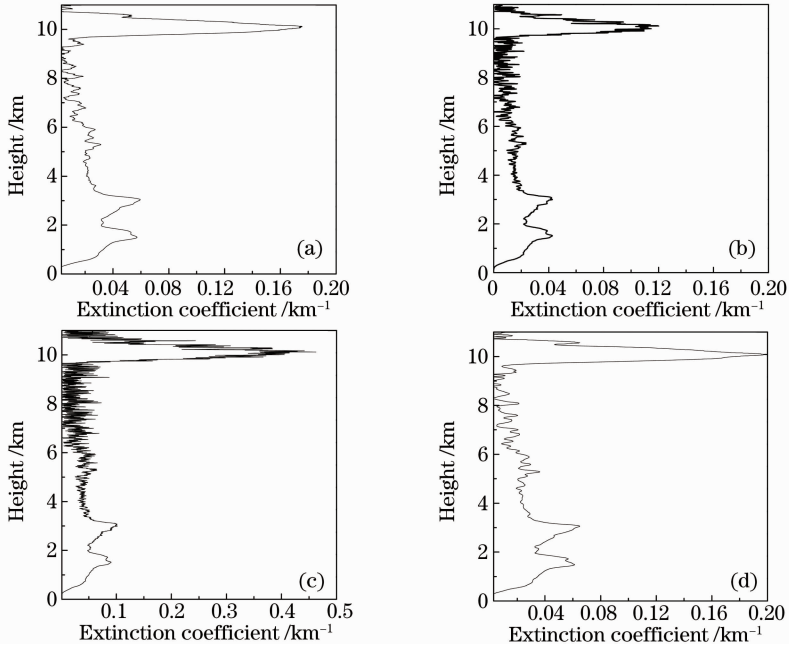


图 5 不同方法消噪后的气溶胶消光系数廓线。(a)平滑窗口法,(b)小波全局阈值消噪法,(c)小波包默认阈值消噪法,(d)小波包平均阈值法

Fig. 5 Extinction coefficient of aerosol retrieved from the signal corrected by (a) sliding-window, (b) wavelet transform based on global threshold, (c) wavelet packet transform based on default threshold, (d) wavelet packet transform based on average threshold

此外,图 5(a)中的平滑窗口法以当前点为中心,前后分别使用了 40 个平滑点数,共计 81 个平滑点数,该小型激光雷达的空间分辨率为 3 m,此时的平滑窗长度达到 243 m,因此,这种方法不仅空间分辨率大为降低,而且不能较好地保持反演结果的细节特征。此外,由于平滑点数过多的原因,这种方法消噪后反演得到的消光系数值,在 10 km 处出现了一定的减小,其消光系数最大为 0.17 km^{-1} 左右,因此,反演廓线出现了一定程度的失真。此外,小波全局阈值法、小波包默认阈值法及小波包平均阈值法均采用 db5 小波函数进行 3 层分解。

从图 5(b)和(c)可以看出,小波包默认阈值消噪法不但对于激光雷达回波信号几乎没有消噪效果,而且利用它消噪后的回波信号反演得到的消光系数值与图 5(a)和(d)相比,值出现了一定比例的扩大;小波全局阈值消噪法消噪效果相对好一点,但是其值也出现了一定比例的缩小。

而从图 5(d)可以看出,利用小波包平均阈值法消噪后反演的消光系数与图 5(a)相比,虽然曲线比较粗糙,但是却能够较好地保持细节,而且,该方法

并未以牺牲空间分辨率为代价来获得消噪效果,仅从这一点上看,其消噪能力便大大优于平滑窗口法,并且能保证廓线不会出现过大的失真。因此,利用平均阈值法可以很好地对激光雷达回波信号进行消噪。此外,从图 5(d)中可以看出,在 1.7 km 和 3 km 处分别存在厚度较薄的气溶胶层,而在高度 9~11 km 处则存在一厚度约为 2 km 的卷云层,其消光系数最大达到了 0.2 km^{-1} 左右。需要指出的是,图 5 中未对近距离的回波信号进行几何重叠因子修正。

在利用小波包平均阈值法进行处理时,针对最优小波包基的每个结点,根据(11)式求取平均阈值后,利用软阈值法对最优小波包基的每个系数进行阈值化处理,可以大大降低高频噪声的系数。图 6 为阈值处理前后最优小波包基高频系数结点 8[即(3,2)结点]的系数曲线图。

可以看出,经过平均阈值处理后,结点 8 的高频噪声大大降低,但是,仍然保持了一定的高频信息,这些保留的高频信息应该是信号的有用成分。

因此,小波包平均阈值法消噪效果在处理激光雷达回波信号时,其效果明显优于前两种方法。

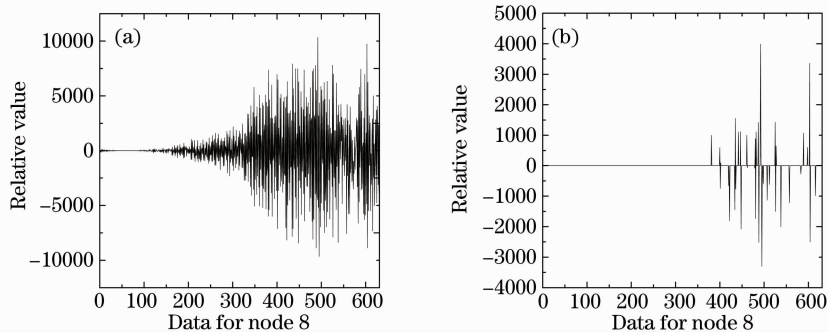


图6 (a)处理前的结点8的系数曲线,(b)经过小波包平均阈值法处理后的结点8的系数曲线

Fig. 6 (a) Coefficient of the node 8 before processing, (b) coefficient of the node 8 processed by wavelet packet transform based on average threshold

6 结 论

根据激光雷达回波信号的噪声是白噪声的特点,提出了一种基于平均阈值的小波包消噪方法,以实现强噪声背景下激光雷达微弱信号的精细提取。分别利用小波全局阈值法、小波包默认阈值法、小波包平均阈值法对含高斯白噪声的信号进行消噪仿真计算,并通过对自行研制的米氏散射激光雷达系统实际探测得到的大气回波信号进行消噪处理,证明了该方法的可行性与实用性。

参 考 文 献

- 1 Bo Guangyu, Zhong Zhiqing, Liu Bo *et al.*. Design of optical receiver and signal detection unit for combined Rayleigh-Raman-Mie lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3020~3025
伯广宇, 钟志庆, 刘 博等. 瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3020~3025
- 2 Ji Chengli, Zhou Jun. New calibration method for Fernald forward inversion of airborne lidar signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2051~2058
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
- 3 Zhao Peitao, Li Wei, Zhang Yinchao *et al.*. Determination of lidar geometric form factor with vibration Raman scattering signals [J]. *Acta Optica Sinica* 2010, **30**(7): 1938~1944
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
- 4 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. 1
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. 1
- 5 Haitao Fang, Deshuang Huang, Yonghua Wu. Antinoise approximation of the lidar signal with wavelet neural networks [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6): 1077~1083
- 6 Songhua Wu, Zhishen Liu, Bingyi Liu. Enhancement of lidar backscatters signal-to-noise ratio using empirical mode decomposition method [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(1): 137~144
- 7 Xiang Dong. Extracting Characteristic Information of Weak Signal from Strong Noise Background by Wavelet Analysis[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. 5

- 8 Wen Li, Liu Zhengshi, Ge Yunjian. Several methods of wavelet denoising[J]. *Journal of Hefe University of Technology*, 2002, **25**(2): 167~172
文 莉, 刘正士, 葛运建. 小波去噪的几种方法[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2002, **25**(2): 167~172
- 9 Haitao Fang, Deshuang Huang. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **233**(1-3): 67~76
- 10 Shirong Yin, Weiran Wang. Denoising lidar signal by combining wavelet improved threshold with wavelet domain spatial filtering [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12): 694~696
- 11 Sun Yankui. Wavelet Analysis and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. 3
孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 3
- 12 J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 13 R. T. H. Collis. Lidar: A new atmosphere probe[J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1966, **92**(392): 220~230
- 14 Frederick G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 15 Hu Changhua, Li Guohua, Liu Tao *et al.*. Wavelet Analysis of System Analysis and Design Based on Matlab 6. X[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. 1
胡昌华, 李国华, 刘 涛等. 基于 Matlab 6. X 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004. 1
- 16 Zheng Haibo. Feature Extraction and Fault Diagnosis of Non-Stationary and Non-Gauss Mechanical Vibration Signals [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002. 6
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. 6
- 17 Han Pu, Zhang Jun, Dong Ze *et al.*. Denoising and detection of steam turbine vibration signals founded on the best wavelet packet basis[J]. *Chinese J. Power Engineering*, 2005, **25**(1): 92~96
韩 璞, 张 君, 董 泽等. 汽轮机振动信号的最优小波包基消噪与检测[J]. *中国动力工程学报*, 2005, **25**(1): 92~96
- 18 Wu Yong. The Study of the Method Based on Wavelet in Signal Denoising[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. 5
吴 勇. 基于小波的信号去噪方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007. 5
- 19 Zheng Fatai, Hua Dengxin, Zhou Awei. Empirical mode decomposition algorithm research & application of Mie lidar atmospheric backscattering signal[J]. *Chinese J. 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
- 20 Mao Jiandong, Hua Dengxin, He Tingyao *et al.*. Lidar observations of atmospheric aerosol optical properties over Yinchuan area[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(7): 2006~2010
- 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