

基于小波去噪算法的全天时大气水汽拉曼 激光雷达探测与分析

王玉峰, 曹小明, 张晶, 汤柳, 宋跃辉, 狄慧鸽, 华灯鑫*

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 提出了一种基于小波阈值去噪算法的白天太阳背景光滤波抑制方法, 实现对拉曼回波信号中真实信号与噪声的分离, 并有效滤除白天背景噪声。基于西安理工大学大气水汽探测拉曼激光雷达系统的全天时实测数据, 详细讨论了分解层数、小波基函数、阈值函数以及阈值选取方法等因素对白天探测回波信号去噪结果的影响, 对去噪前后信号进行分析并对去噪评价函数进行对比, 当利用小波基 sym6、分解层数为 5 层, 并采用改进阈值函数和改进通用阈值方法的最优条件时, 可实现对白天水汽拉曼散射信号和米-瑞利散射信号较好的去噪效果。讨论了小波去噪前后大气水汽混合比反演廓线和激光雷达水汽探测信噪比(SNR)的结果, 分析表明利用该去噪系统得到的白天激光雷达水汽探测 SNR 提高约 3.4 倍, 水汽探测距离可从 1.5~2 km 提高到 3 km 以上。开展全天时激光雷达连续探测实验和去噪处理, 获得了 24 h 边界层内大气水汽混合比的连续变化特性, 并得到与近地面气象站数据的较一致的结果, 充分验证了小波去噪算法应用于全天时大气水汽探测的可行性和有效性。

关键词 大气光学; 拉曼激光雷达; 水汽; 小波去噪; 全天时

中图分类号 P413

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0201001

Detection and Analysis of All-Day Atmospheric Water Vapor Raman Lidar Based on Wavelet Denoising Algorithm

Wang Yufeng, Cao Xiaoming, Zhang Jing, Tang Liu,

Song Yuehui, Di Huige, Hua Dengxin

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract A method based on the wavelet threshold denoising algorithm is proposed for the suppression of solar background light, so that the separation of the real signal from the noise in the Raman returned signal can be realized and the background noise in daytime can be removed. Based on all-day data measured by atmosphere water vapor Raman lidar system built in Xi'an University of Technology, influences of decomposition level, wavelet function, threshold function, and threshold selection method on the denoising results of returned signal in daytime are discussed. Signals before and after denoising are compared and denoising evaluation functions are compared. We adopt wavelet sym6, decomposition of five layers, improved threshold function, and improved threshold method to obtain the better denoising effect for water vapor Raman and Mie-Rayleigh scattering signals in daytime. Furthermore, profiles of the atmospheric water vapor mixing ratio, and the results of signal-to-noise ratio (SNR) of water vapor are discussed. Results show that SNR for lidar water vapor measurement increases by 3.4 times in the denoising process. and the water vapor detection range can be improved up to over 3 km from 1.5-2 km in daytime. Lidar continuous detection experiments and denosing process are carried out during 24 h. Variation characteristics of the atmospheric water vapor mixing ratio are obtained below boundary layer, and the results agree with data from near-surface weather stations. It is verified the feasibility and effectiveness of the wavelet denoising algorithm used in all-day atmospheric water vapor detection.

收稿日期: 2017-07-27; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(U1733202, 41575027, 61308105)

作者简介: 王玉峰(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。

E-mail: wangyufeng@xaut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

Key words atmospheric optics; Raman lidar; water vapor; wavelet denoise; all-day

OCIS codes 010.7340; 280.3640; 100.7410

1 引 言

水汽是气候和气象的重要因素,是水文循环系统中最活跃的成分之一^[1]。大气中的水汽含量是人工增雨的重要基础,长期以来水汽对气候的影响备受科学家关注^[2-3]。由于大气过程的连续性和变化性,利用测量的全天时大气水汽含量可以表征大气参数的时空变化情况,对于研究区域生态系统和社会经济有着重要的意义。因此,大气水汽的全天时探测不仅有助于对全球和区域气候变化、云的形成和降水的研究,而且可以为大气水资源的有效利用提供理论依据^[4]。

激光雷达凭借其高时空分辨率、高探测灵敏度和强抗干扰能力等优点,已成为一种有效的大气探测手段,在大气气象与环境探测中得到越来越广泛的应用^[5-9]。随着激光技术和弱信号检测技术的不断发展,拉曼激光雷达已成为探测大气水汽、气溶胶、温度等大气参数的重要手段之一。近年来,国内外众多科研机构 and 学者都开展了大气水汽探测拉曼激光雷达系统的研究工作,取得了较好的研究成果^[10-12]。

在全天时激光雷达探测中,仍然存在白天强背景光的问题。由于白天强太阳背景光的影响,极弱的拉曼散射信号极有可能会被污染甚至淹没在噪声里,因此,如何在强白天背景光中提取有用的弱拉曼散射信号,即白天强太阳背景光的去噪问题是全天时水汽探测的关键技术和难点之一。激光雷达回波信号包含有效信号以及各种噪声信号,具有非平稳的特性。目前,对激光雷达信号的去噪方法主要有均值滤波、经验模态分解(EMD)和小波分解等方法。近些年相关科研机构已开展了对激光雷达晚间探测回波信号的去噪研究。田力等^[13]通过分析对比获得了适合瑞利散射信号的小波分解层数、阈值选取规则及阈值函数,并利用软阈值法反演获得南京上空平流层 28~46 km 的温度廓线;Wu 等^[14]证明了经验模态分解法可提高激光雷达信号信噪比(SNR);Tian 等^[15]采用了 EMD 方法对激光雷达信号进行降噪;Yin 等^[16]提出利用改进的小波阈值去噪法和小波域空间滤波相结合的去噪方法对激光雷达脉冲信号进行仿真分析。以上研究多针对夜间探测的激光雷达米散

射和瑞利散射信号去噪问题,多集中在电噪声和白噪声的去噪研究,而对白天背景光的去噪问题,尤其是针对极弱的拉曼散射回波信号的研究较少。近期,Zhou 等^[17]针对白天强背景光下米散射激光雷达回波信号和噪声的特点,提出了利用小波软阈值法消除白天背景光和探测系统的电噪声,反演结果显示有效探测距离从 2.5 km 提高到 5 km,证明了小波去噪方法在白天背景下对米散射激光雷达信号去噪的有效性。

相比于弹性米散射和瑞利散射信号来说,大气分子的拉曼散射信号要低 3~4 个数量级,如何在白天强背景光的影响下提取弱拉曼散射回波信号,将是本文着重讨论的问题。以全天时大气水汽探测为目标,从小波去噪原理出发,详细讨论了去噪过程中各去噪元素对白天实测水汽拉曼散射回波信号去噪结果的影响,以获得适用于弱拉曼散射信号的小波基函数、阈值和阈值函数,并开展全天时激光雷达探测实验和数据反演,通过比较和分析不同的评价方法,验证小波去噪算法的有效性和在全天时水汽探测中的可行性。

2 激光雷达系统及其数据处理方法

2.1 水汽探测拉曼激光雷达系统

采用的水汽探测拉曼激光雷达系统如图 1 所示。系统建于西安理工大学激光雷达大气遥感中心,主要系统参数如表 1 所示。表 1 中 T 代表透射率, R 代表反射率。该系统采用 Nd:YAG 脉冲激光器的 3 倍频输出作为激励光源,激光波长为 354.7 nm,重复频率为 20 Hz,激光能量为 100 mJ。脉冲激光经扩束准直后射向大气,大气回波信号被直径为 600 mm 的望远镜接收,并耦合进入多模光纤,经透镜准直后进入由二向色镜和窄带干涉滤光片构成的高性能拉曼分光系统,可实现 3 个独立光通道信号的精细分光。其中通道 1 为米-瑞利散射通道;通道 2、3 分别为氮气和水汽拉曼散射通道,可结合用来反演大气水汽混合比。最后经光电倍增管(PMT,型号 Hamamatsu R3896)探测各回波信号。考虑到全天时大气水汽探测中白天强太阳背景光的影响,采用直径为 200 μm 的光纤控制望远镜的接收视场范围,并采用带宽为 0.5 nm 的窄带滤光片进一步抑制背景光和杂散光。

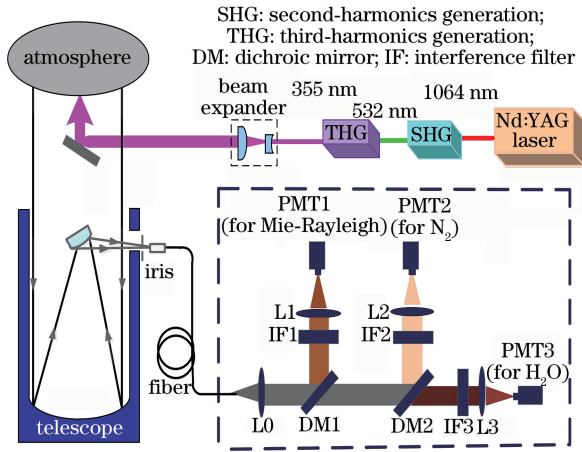


图 1 水汽探测拉曼激光雷达系统示意图
Fig. 1 Schematic of Raman lidar system for water vapor measurement

表 1 拉曼激光雷达系统主要参数

Table 1 Specification parameters of Raman lidar system

Parameter	Value
Laser wavelength	354.7 nm
Laser energy per pulse	150 mJ
Laser pulse repetition rate	20 Hz
Telescope diameter	600 mm
Field of view	0.2 mrad
Focal length	2000 mm
DM1	$R > 99\%$ at 350-365 nm, $T > 90\%$ at 380-430 nm
DM2	$R > 99\%$ at 360-395 nm, $T > 90\%$ at 400-430 nm
Central WL of IF1	354.7 nm
Bandwidth of IF1	0.5 nm
Peaktransmittance of IF1	65%
Central WL of IF2	386.7 nm
Bandwidth of IF2	0.5 nm
Peaktransmittance of IF2	65%
Central WL of IF3	407.6 nm
Bandwidth of IF3	0.5 nm
Peaktransmittance of IF3	65%

2.2 大气水汽反演方法

根据水汽混合比的定义,利用水汽和氮气分子的拉曼散射回波信号强度 $P_H(z)$ 和 $P_N(z)$,可反演获得大气混合比随高度的变化,即

$$w(z) = C_H \times \frac{P_H(z)}{P_N(z)} \exp\left\{\int_{z_0}^z [\alpha_{\lambda_H}(z') - \alpha_{\lambda_N}(z')] dz'\right\}, \quad (1)$$

式中 C_H 为系统的标定常数; $\alpha_{\lambda_H}(z')$ 、 $\alpha_{\lambda_N}(z')$ 为水汽和氮气拉曼散射波长下的消光系数,指数表达式为大气透过率修正函数,与消光系数有关。因此,基

于拉曼激光雷达的大气水汽混合比探测误差为 $\Delta w/w$,与氮气拉曼散射通道和水汽拉曼散射通道的探测 SNR (S_N 和 S_H) 有关,可表示为

$$\frac{\Delta w}{w} = \left[\left(\frac{1}{S_H} \right)^2 + \left(\frac{1}{S_N} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中 S_N 和 S_H 可表示为

$$S_{N/H} = \frac{\sqrt{N} n_s(z)}{\sqrt{n_s(z) + 2(n_B + n_D)}}, \quad (3)$$

式中 N 为平均采样脉冲数; $n_s(z)$ 为各通道接收的回波信号光子数,与各通道回波信号强度 P 有关; n_B 为通道中的太阳背景光光子数; n_D 为探测器的暗电流光子数。激光雷达探测得到的 SNR 是高度的函数,不同高度上的 SNR 不同,一般 SNR 随着探测高度的增加而降低。在白天探测时,太阳背景光是主要噪声。

2.3 小波阈值去噪方法与评价

小波阈值去噪方法已经广泛应用于信号分析、图像处理、语音识别、故障诊断等领域。含噪信号经过小波分解后,真实信号的小波系数幅值较大,而噪声的小波系数幅值较小。因此,通过在不同尺度上选取合适的阈值,对小波系数进行适当阈值化处理,即可分离有用信号和噪声,用处理后的小波系数进行小波逆变换,即可重构去噪后的信号^[18-21]。

激光雷达的含噪信号可以表示为

$$f(t) = s(t) + \sigma e(t), 1 \leq t \leq M, \quad (4)$$

式中 $s(t)$ 为真实激光雷达信号, $e(t)$ 为一个服从正态分布的高斯白噪声, σ 为噪声系数, M 为离散采样序列 $f(t)$ 的长度。对于激光雷达白天探测来说, $e(t)$ 主要是太阳背景光噪声和探测系统的电噪声。

含噪信号可表示为低频和低频信号的总和,即

$$f(t) = \sum a_k^{j-1} \varphi(2^{j-1}t - k) + \sum d_k^{j-1} \psi(2^{j-1}t - k), \quad (5)$$

式中 $\sum a_k^{j-1} \varphi(2^{j-1}t - k)$ 和 $\sum d_k^{j-1} \psi(2^{j-1}t - k)$ 是 $f(t)$ 的低频分量和高频分量,分别代表 $f(t)$ 的近似信息和细节信息,其中 a_k^{j-1} 是逼近系数, d_k^{j-1} 是小波系数(下文中简记为 w), $\varphi(t)$ 为尺度函数, $\psi(t)$ 为小波函数,可分别表示为

$$\varphi(2^{j-1}t - l) = \sum h_{k-2l} \varphi(2^j - k), \quad (6)$$

$$\psi(2^{j-1}t - l) = \sum (-1)^k \bar{h}_{1-k+2l} \varphi(2^j - k), \quad (7)$$

$$a_l^{j-1} = \frac{1}{2} \sum \bar{h}_{k-2l} a_k^j, \quad (8)$$

$$d_l^{j-1} = \frac{1}{2} \sum (-1)^k h_{1-k+2l} a_k^j, \quad (9)$$

式中 k 和 j 都为正整数, j 为分解层数, k 为信号和噪声的长度, l 是和离散格点有关的正整数。 h 为滤波器函数, 其值由选择的小波基决定; \bar{h} 为 h 函数的共轭函数。上述关系式各下标均表示了不同尺度下的各函数和系数的平移关系。最后信号的小波重构公式为

$$a_k^j = \sum h_{k-2l} a_l^{j-1} + \sum (-1)^k \bar{h}_{1-k+2l} d_l^{j-1}。 \quad (10)$$

因此, 小波阈值去噪的基本步骤为: 1) 选取适当的小波基和分解层数对含噪信号 $f(t)$ 进行小波分解, 得到小波系数 ω ; 2) 选取阈值 λ ; 3) 对小波系数 ω 进行阈值处理, 得到小波系数的估计值 $\hat{\omega}$; 4) 用小波逆变换对 $\hat{\omega}$ 进行重构, 得到估计信号 $\hat{f}(t)$, 即去噪后的信号。

通常, 去噪前后效果可通过去噪 SNR 和均方根误差(RMSE)等评价函数分析获得。定义 s_i 为原始信号, d_i 为去噪后的信号, n 为信号长度, 则去噪 SNR 可定义为

$$S_Q = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{\sum_{i=1}^n (s_i - d_i)^2}。 \quad (11)$$

RMSE 的计算公式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - d_i)^2}{n}}。 \quad (12)$$

可见, 小波去噪 SNR 代表了去噪信号的平均 SNR, 与激光雷达系统的探测 SNR 不同。

3 白天探测水汽拉曼散射信号的去噪过程

利用图 1 所示的地基式大气水汽探测拉曼激光雷达系统, 开展全天时大气水汽探测与分析, 本节将详细探讨白天探测所得大气水汽拉曼散射回波信号的去噪过程, 具体分析在小波阈值去噪过程中不同小波基函数、分解层数、阈值获取方法以及阈值函数等因素对去噪效果的影响, 并得出最优结论。以 2016 年 9 月 12 日中午 11:20 探测得到的水汽拉曼散射信号和米-瑞利散射信号作为分析对象, 当天天气情况是晴, 能见度约为 20 km, 激光器能量为 100 mJ, 累计积分时间为 5 min。

3.1 小波基选取与分析

小波函数中有 3 种常见离散小波族, 分别为 Daubechies (db) 小波族、Symlets (sym) 小波族和

Coiflets (coif) 小波族。首先讨论不同的小波基对激光雷达信号去噪效果的影响。要说明的是, 当分解层数过少时, 不能有效去除噪声; 当分解层数过多时, 去噪后信号 SNR 反而下降。因此, 考虑到噪声具有一定的频带宽度, 随着层数的增加, 噪声逐渐减弱, 通常选择层数为 3~6, 根据经验采用分解层数为 5 层。

图 2(a) 中给出了利用不同小波基函数对水汽拉曼散射回波信号的去噪评价结果, 其中上面 3 条符号曲线为别为 3 个小波族不同去噪长度下的去噪 SNR, 下面 3 条曲线则分别对应去噪 RMSE 曲线。可以看到, 选用 3 个不同小波族进行去噪的 SNR 差异较大, 而且, 对于同一小波族函数, 滤波器长度对去噪后的 SNR 影响也较大。当选用 coif 小波基函数时, 随着去噪长度由 1 增大到 5 时, 去噪 SNR 逐渐增大, 由 38.5 提高至 40, 相对应地, 去噪后的 RMSE 则逐渐降低。当选用 sym 和 db 小波族时, 滤波器长度对去噪 SNR 影响较大, 随着去噪滤波器长度的增加, 去噪效果呈现先增强后下降再趋于平缓的趋势。总体来说, 利用 sym 小波族去噪得到的 SNR 均高于 db 小波族去噪结果, 尤其是当取 sym6 和 sym7 小波基时去噪 SNR 取得最大值, RMSE 达到最小值。为了更直观地表示小波基对去噪结果的影响, 选取几个代表性滤波器长度的小波基函数对白天探测水汽拉曼散射信号进行去噪分析, 获得去噪前后的距离校正平方信号结果与对比, 如图 2(b) 所示。为了清晰表示, 对图 2(b) 中各曲线之间进行了一定的平移。从原始回波距离校正平方信号波形 (黑实线) 看, 由于受到强噪声的影响, 1500 m 高度以上回波信号被淹没在噪声中, 有效探测距离不足 2000 m。当使用小波基 sym2 去噪后, 回波信号产生了锯齿形状, 较为不光滑, 而利用 db4、sym6 和 sym12 小波基都较好地去掉了噪声, 去噪结果信号较为光滑。此时, 对应去噪后的 SNR 分别为 38.95, 40.07, 39.28, RMSE 分别为 2.41×10^{-7} , 1.86×10^{-7} , 2.23×10^{-7} , 可见利用小波基 sym6 进行小波阈值去噪时, 去噪 SNR 最高, RMSE 最小。

为了考虑小波基选取的普遍性, 在此对一组白天探测米-瑞利散射回波信号也进行了去噪效果分析。图 3(a) 分别给出了利用不同小波基函数对米-瑞利散射回波信号进行去噪的结果, 可以看到, 当选取不同滤波器长度的小波族进行去噪时, SNR 和 RMSE 也存在较大的差异, 当滤波器长度大于 6

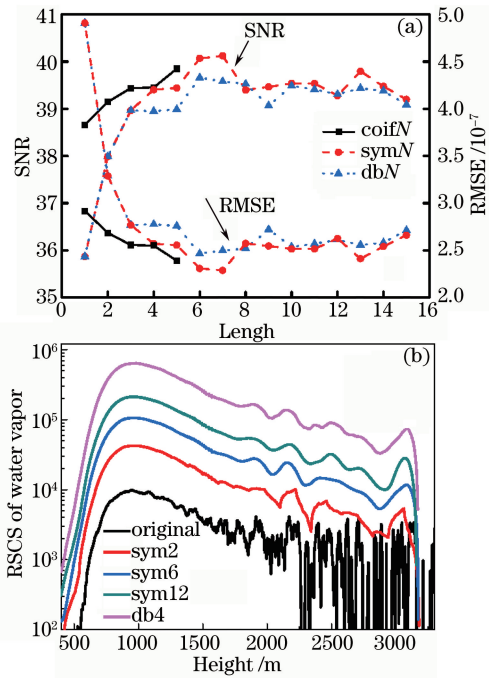


图 2 一组白天探测水汽拉曼散射信号去噪前后对比。

(a)采用不同滤波器长度的小波族去噪后 SNR 和 RMSE 比较；(b)去噪前后距离校正平方结果比较

Fig. 2 Comparison of water vapor Raman scattering signals before and after denoising detected in daytime. (a) SNR and RMSE denoised by wavelet basis with different filter lengths; (b) comparison of range-square-corrected results before and after denoising

时,利用 sym 小波族去噪 SNR 也均大于 db 小波族的结果,其中 sym6 的去噪 SNR 取得最大值,相对应的 RMSE 最小,为 7.38×10^{-8} 。图 3(b)给出了利用几个代表性小波基函数对米-瑞利散射回波信号去噪前后的回波距离校正平方信号(RSCS)比较,图 3(b)中同时给出了白天探测米-瑞利散射去噪前的原始回波距离校正平方信号,由于探测时段内在 6000~7000 m 处有云层,因此,详细分析了云层前后(对应高度为 5500~8000 m)的去噪结果。黑线对应去噪前原始回波距离校正平方信号,其余各曲线分别对应利用 sym2,sym6,sym12 和 db4 小波基函数去噪后的距离校正平方信号,并进行了相应的平移。由图 3 可以清晰看到,当利用 sym2 小波基函数时,去噪后的结果在云层后(高度约为 7000 m)出现了突变,并伴有锯齿波形,且不光滑。当利用 db4 和 sym12 小波基函数时,去噪后的结果在过云层后约 7200 m 高度处均出现了较大的畸变,引起了信号的失真。利用 sym6 小波基的去噪结果最为光滑,未出现明显突变和畸变,将其与原始信号进行对比,可以看出该结果较为真实地保留了信号,去除

了噪声,去噪效果最佳。因此,以上对水汽拉曼散射信号和米-瑞利散射信号的去噪效果评价和回波信号波形对比的结果表明,使用 sym6 小波基函数可有效滤除白天背景光噪声,获得最佳的去噪效果,因此选择 sym6 小波基进行去噪。

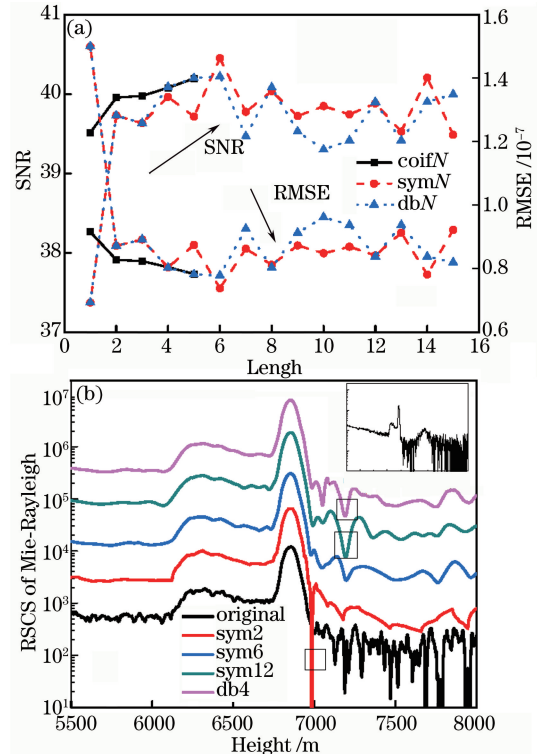


图 3 一组白天探测米-瑞利散射信号去噪前后对比。

(a)采用不同滤波器长度的小波族去噪后 SNR 和 RMSE; (b)去噪前后距离校正平方结果比较

Fig. 3 Comparison of Mie-Rayleigh scattering signals before and after denoising in daytime. (a) SNR and RMSE denoised by wavelet basis with different filter lengths; (b) comparison of range-square-corrected results before and after denoising

3.2 阈值函数对比与分析

在小波阈值去噪中,一般可利用硬阈值函数和软阈值函数对小波系数 ω 进行阈值处理,得到小波系数的估计值 $\hat{\omega}$ 。硬阈值函数由于 $\hat{\omega}$ 在 λ 和 $-\lambda$ 处不连续,重构信号会产生一定振荡。软阈值函数虽然连续性好,但当小波系数较大时,得到的估计信号与原信号存在恒定偏差,因此,硬阈值函数和软阈值函数均存在着一些缺陷。而改进的阈值函数兼具了软硬阈值的优点,又克服了软硬阈值的缺陷,可获得更为理想的去噪效果,它通过调节因子 α 来获得连续变化且合适的阈值函数。利用软阈值、硬阈值和改进阈值函数对白天探测水汽拉曼散射信号进行去噪处理,得到去噪前后的水汽拉曼散射距离校正平

方信号,结果如图 4 所示。可以看出,采用硬阈值函数去噪后的水汽信号出现弱振荡,由利用软阈值和改进阈值函数的小波去噪结果可以看出,曲线基本一致,且较为平滑。同时,图 4 中分别给出了去噪后 SNR 和 RMSE 的评价结果,通过比较可以发现,利用改进阈值函数去噪的 SNR 可达到 49.66,高于硬阈值去噪和软阈值的去噪 SNR(分别为 44.15 和 46.22)。因此,综合考虑去噪前后回波信号波形和评价结果,利用改进阈值函数对白天水汽拉曼回波信号进行去噪,可得到更高的去噪 SNR,且误差最小。

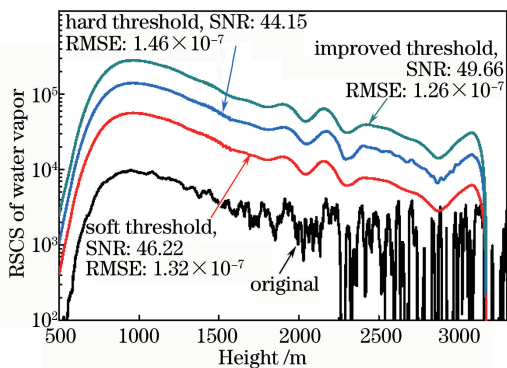


图 4 利用不同阈值函数对白天水汽拉曼散射信号进行去噪的结果

Fig. 4 Denoising results of daytime water vapor Raman scattering signals denoised with different threshold functions

3.3 阈值选取与分析

常见的阈值估计方法主要有启发式阈值、自适应阈值、通用阈值、极大极小阈值和改进阈值选取方式。其中,通用阈值选取方式最为简单且应用广泛,但是存在“过扼杀”小波系数现象,在通用阈值基础上发展的改进阈值方法可获得不同分解尺度下不同的分解层阈值。利用上述 5 种阈值选取方法对白天探测水汽拉曼散射信号进行去噪分析。图 5(a)给出了去噪前后水汽距离校正平方信号的结果,图 5(a)中最下方黑线对应去噪前的水汽信号,依次往上分别对应启发式阈值、自适应阈值、通用阈值、极大极小阈值以及改进阈值的去噪结果。从整体波形上看,这 5 种阈值选取方法都达到了一定的去噪效果,但是,在 2250 m 高度处的水汽信号均出现了较大的畸变,尤其是当采用自适应阈值方法去噪后信号出现了明显的振荡现象,利用改进的阈值进行去噪的效果最佳,信号变化平缓且较光滑,未出现畸变等现象。同时,图 5(b)也给出了利用不同阈值方法去噪后 SNR 和 RMSE 的比较结果。通过比较可以发现,利用自适应阈值得到的去噪 SNR 最高, RMSE 最小,利用改进的通用阈值方法获得的去噪

后 SNR 均高于其余阈值方法。因此,由波形和评价结果的对比可以看出,利用改进阈值方法更有利于获得较好的去噪效果。

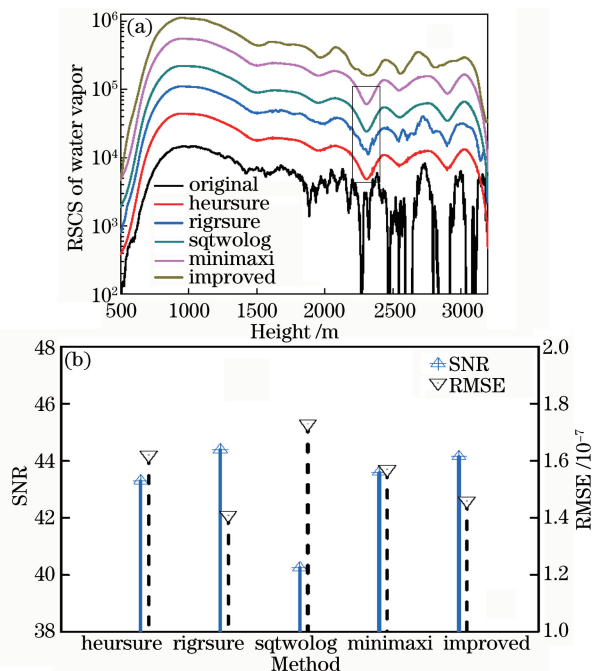


图 5 利用不同阈值获取方法对白天探测水汽拉曼散射信号进行去噪的结果。(a) 距离校正平方信号; (b) SNR 和 RMSE

Fig. 5 Denoising results of water vapor Raman scattering signals denoised by different threshold acquisition methods in daytime. (a) RSCS; (b) SNR and RMSE

从米-瑞利散射信号的去噪过程中也可以获得同样的去噪结果,如图 6 所示。可以看出,利用改进的通用阈值方法得到的去噪后信号较为平滑,云层前后信号较为光滑,未出现强烈的失真,去噪后 SNR 也较高,误差较小。而利用其余 4 种阈值方法去噪后的结果分别在 7000 m 和 7223 m 高度处出现了明显的畸变信号,对应的 SNR 和 RMSE 如图 6(b)所示,使用改进的通用阈值去噪后信号较光滑,SNR 较高, RMSE 较小。

此外,利用水汽拉曼激光雷达系统开展了大量的白天激光雷达探测实验,并对多组不同天气条件下白天探测大气回波信号进行了详细的去噪过程与结果分析。通过比较可以得到,当利用小波基 sym6、分解层数为 5 层,并采用改进的阈值函数和改进通用阈值方法时,可高效滤除白天强太阳背景光,实现对白天探测水汽拉曼散射信号和米-瑞利散射信号的有效去噪。

4 白天探测水汽混合比的去噪验证

在白天探测时,利用水汽拉曼激光雷达系统,根

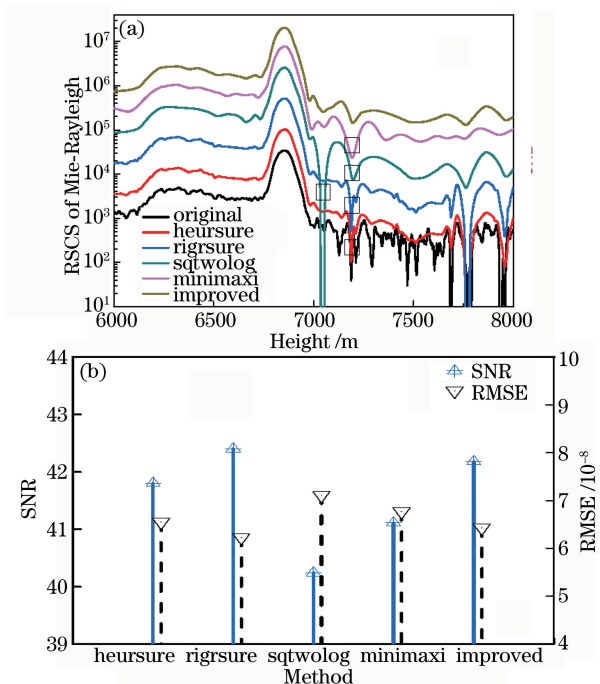


图 6 利用不同阈值获取方法对米-瑞利散射信号进行去噪的结果。(a)距离校正平方信号；(b) SNR 和 RMSE
Fig. 6 Denoising results of Mie-Rayleigh scattering signals denoised by different threshold acquisition methods in daytime. (a) RSCS; (b) SNR and RMSE

据上述去噪算法进行水汽混合比的反演和结果分析。图 7 给出了 2016 年 9 月 15 日下午 16:00 CST (中央时区)的激光雷达探测结果,图 7(a)为去噪前后水汽通道和氮气通道回波信号距离校正平方信号及其对比,图 7(b)对应去噪前后的水汽混合比廓线。通过比较可以看出,去噪前水汽通道探测的回波信号强度在 2000 m 以上出现了强烈波动,信号被淹没在噪声中。因此,该天气条件下水汽拉曼散射信号的探测距离仅达到 2000 m,通过小波阈值去噪算法可有效去除水汽拉曼散射信号中的噪声,使得水汽通道的距离校正平方信号有了较大的改善,有效探测距离提高至 3200 m,且去噪后信号较为光滑,在 1800~2200 m 之间水汽信号出现较小的波动,与原始信号波形相一致。同样,在去除白天背景光后,氮气通道的有效探测距离也得到提高。因此,利用(1)式反演获得大气水汽混合比廓线,如图 7(b)所示,去噪后水汽混合比的反演高度可提高至 3200 m,水汽混合比随着高度的升高而缓慢减小。利用(2)、(3)式分析了白天去噪前后水汽探测 SNR 随高度的变化趋势,结果如图 7(c)所示。去噪前,2000 m 以上高度的水汽探测 SNR 曲线呈现散点状,探测误差较大,小波阈值去噪后拉曼激光雷达探

测水汽的 SNR 可提高约 3.4 倍,当 SNR 取 10 时,大气水汽混合比的有效探测高度从 2000 m 提高到 3200 m,表明基于小波阈值算法可有效去除太阳背景光和其他噪声,提高了系统的探测 SNR 和探测高度,从而提高拉曼激光雷达系统在白天的探测性能。

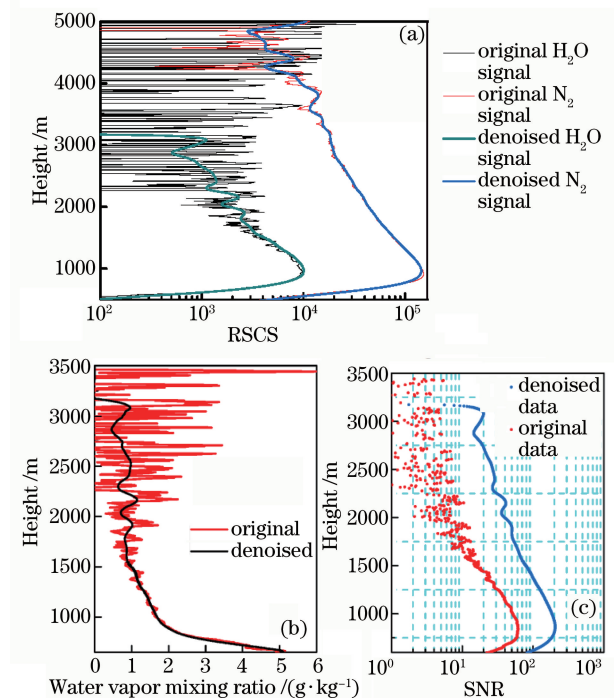


图 7 白天激光雷达探测去噪前后的结果比较。
(a)水汽和氮气拉曼散射回波距离校正平方信号；
(b)水汽混合比廓线；(c)水汽探测 SNR
Fig. 7 Comparison of lidar detection results before and after denoising in daytime. (a) RSCS of water vapor and nitrogen Raman scattering; (b) water vapor mixing ratio profile; (c) SNR of water vapor detection

图 8 给出了小波去噪前后米-瑞利散射信号和水汽拉曼散射信号的回归关系,采用 10 组激光雷达数据进行去噪前后的比较,横坐标为去噪前的原始回波信号强度,纵坐标为去噪后的回波信号强度。可以明显看出,两组信号的线性相关性较好,拟合优度 R^2 分别为 0.999 和 0.995,同时两组信号小波去噪结果的 F 检验值分别为 8.93×10^7 和 2.45×10^5 ,远大于 $F_{0.01}(1, N-2) = 6.64$,说明回归是高度显著的,上述 2 个参数从回归分析的角度也证明了小波阈值去噪算法对白天米-瑞利散射信号和水汽拉曼散射信号去噪的有效性。

5 大气水汽的全天时连续探测结果与分析

为了验证小波阈值去噪方法在全天时大气水汽

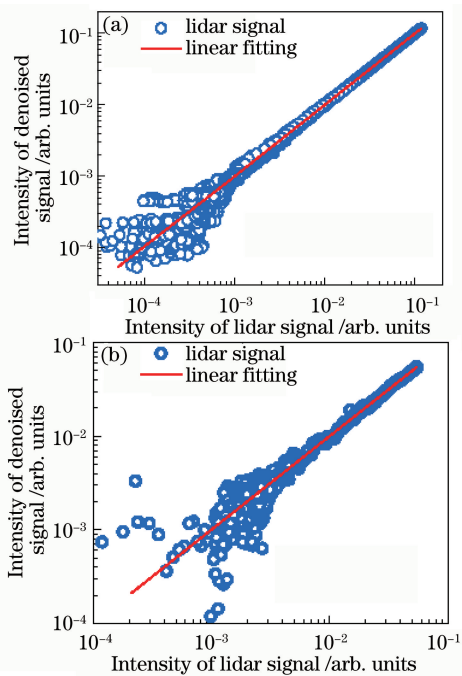


图 8 去噪前后激光雷达信号的回归关系。
(a)米-瑞利散射信号；(b)水汽拉曼散射信号

Fig. 8 Regression relationship of lidar signal before and after denoising. (a) Mie Rayleigh scattering signal;
(b) water vapor Raman scattering signal

探测中的去噪效果,依托西安理工大学激光雷达遥测中心的地基激光雷达系统开展了连续的全天时观测实验。图 9 给出了 2016-09-22 00:00—2016-09-23 00:00 的连续探测结果,历时 24 h,图 9(a)、(b) 分别对应去噪前和去噪后反演获得的水汽混合比随时间和空间连续变化的 THI (Time-Height-Indicator)。在 2016-09-22 00:00—06:00 CST 探测时段内水汽混合比随高度逐渐减少,底层大气水汽混合比较大,并随着时间推移呈现缓慢减小趋势,在 2016-09-22 06:00—07:00 时段内 1000 m 以下水汽混合比值最小。在 2016-09-22 07:00—18:00 CST 白天探测时段内,利用小波阈值算法去噪后大气水汽的有效探测距离由小于 2000 m 提高到 3000 m 以上,水汽混合比随时间变化,底层水汽呈现先增加后逐渐减小再增强的趋势。2016-09-22 18:00 后底层水汽混合比明显提高,达到 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时 1000~2500 m 高度范围内大气水汽混合比也呈现快速增加趋势。因此,利用小波阈值去噪算法和大气水汽反演技术,实现了大气边界层内大气水汽的全天时探测,获得了大气水汽混合比的连续时空变化特性。

利用西安理工大学气象站数据,获得了 24 h 内近地面水汽混合比的变化趋势,如图 10 所示,近

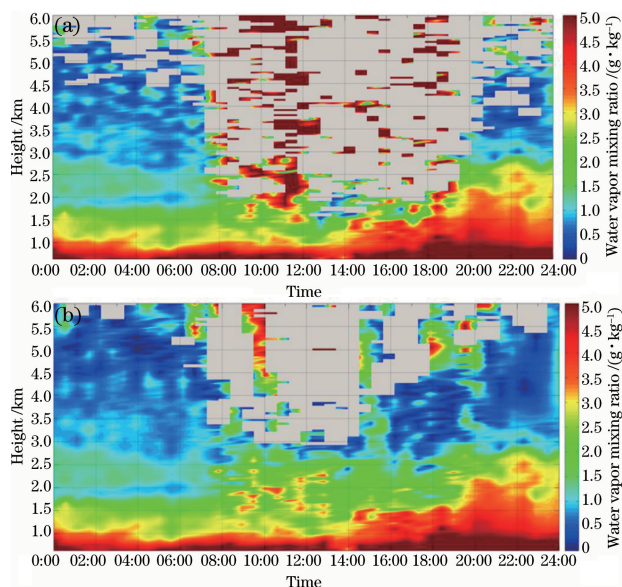


图 9 2016-09-22 00:00—2016-09-23 00:00 连续探测水汽混合比 THI 图的去噪前后结果比较。(a) 去噪前；(b) 去噪后

Fig. 9 THI displays of water vapor mixing ratio in 2016-09-22 00:00—2016-09-23 00:00 before and after denoising. (a) Before denoising; (b) after denoising

地面大气水汽混合比在探测时段内呈现先减小后增加、再明显增加的趋势。因此,利用拉曼激光雷达系统获得的全天时连续探测大气水汽混合比与近地面气象站数据具有较好的一致性。

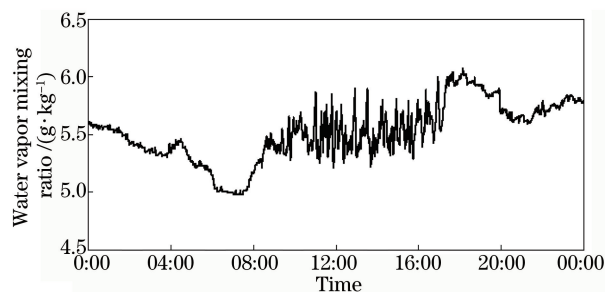


图 10 2016-09-22 00:00—2016-09-23 00:00 气象站的水汽混合比变化

Fig. 10 Variation of water vapor mixing ratio taken by meteorological station in 2016-09-22 00:00—2016-09-23 00:00

6 结 论

全天时大气参数的高精度探测一直是激光雷达遥感的技术难题,需解决全天时探测中白天强太阳背景光的去噪技术。从全天时大气水汽激光雷达探测技术出发,以如何在强白天背景光的影响下提取有用的水汽拉曼散射信号为目标,提出了一种基于小波阈值去噪算法的白天太阳背景光高精度滤波抑制方法。利用西安理工大学地基式全天时水汽探测

拉曼激光雷达系统,从小波阈值去噪原理出发,详细讨论了分解层数、小波基函数、阈值函数以及阈值选取等因素对白天水汽拉曼散射信号去噪结果的影响,对激光雷达探测实测数据进行分析并对去噪评价函数进行对比,当利用小波基 sym6、分解层数为5层,并采用改进的阈值函数和改进通用阈值方法的最优条件时,可获得对水汽拉曼散射回波信号和米散射信号较好的去噪效果,去噪后 SNR 提高, RMSE 减小,真实地保留了原始信号,回波信号距离校正平方信号较为光滑,不失真。进行了白天探测水汽混合比的去噪验证,根据拉曼激光雷达水汽混合比反演方法和大气水汽探测 SNR 理论,通过去噪前后的结果比较和分析表明,利用最优条件的小波阈值去噪算法去噪后白天激光雷达水汽探测 SNR 可提高约 3.4 倍,水汽探测距离可从 1.5~2 km 提高至 3 km 以上,有效地提高了大气水汽探测 SNR 和探测高度,对大气水汽的全天时探测具有重要意义。

开展了全天时大气水汽的激光雷达连续探测实验,利用小波阈值去噪算法和大气水汽反演技术,实现了大气边界层内大气水汽的全天时探测,获得了大气水汽混合比的连续时空变化特性,并将其结果与近地面气象站数据进行比对,发现二者具有较好的一致性,充分验证了小波去噪算法应用于全天时大气水汽探测的可行性和有效性,所获得边界层内大气水汽混合比的连续高时空分辨率数据将为研究大气水汽的长期变化特性以及为降水、水循环等的研究提供可靠的数据支持。同时,可将该去噪方法应用于对温度转动拉曼散射信号等弱拉曼散射信号的去噪问题中,有望获得全天时的大气温度、水汽和气溶胶激光雷达探测,为大气气候变化以及雾霾生消过程的研究提供实时可靠的连续探测数据。

参 考 文 献

- [1] Harries J E. Atmospheric radiation and atmospheric humidity[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1997, 123(544): 2173-2186.
- [2] Soden B J, Held I M. An assessment of climate feedbacks in coupled atmosphere-ocean models [J]. Journal of Climate, 2006, 19(14): 3354-3360.
- [3] Mears C A, Santer B D, Wentz F J, *et al.* Relationship between temperature and precipitable water changes over tropical oceans [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(24): L24709.
- [4] King M D, Menzel W P, Kaufman Y J, *et al.* Cloud

and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 442-458.

- [5] Jia J Y, Yi F. Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5-30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5330-5343.
- [6] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Characteristics of boundary layer height in Jing-Jin-Ji area based on lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010101.
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010101.
- [7] Xu J W, Liu D, Xie C B, *et al.* Multi-wavelength fitting simulation and inversion of atmospheric aerosol spectrum distribution [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001006.
徐继伟, 刘东, 谢晨波, 等. 大气气溶胶谱分布的多波长拟合模拟反演研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001006.
- [8] Cheng Z T, Liu D, Liu C, *et al.* Multi-longitudinal-mode high-spectral-resolution lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0401001.
成中涛, 刘东, 刘崇, 等. 多纵模高光谱分辨率激光雷达研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0401001.
- [9] Li Y J, Song S L, Li F Q, *et al.* High-precision measurements of lower atmospheric temperature based on pure rotational Raman lidar [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2294-2305.
李亚娟, 宋沙磊, 李发泉, 等. 基于纯转动 Raman 激光雷达的中低空大气温度高精度探测 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2294-2305.
- [10] 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.
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.
- [11] Froidevaux M, Higgins C W, Simeonov V, *et al.* A Raman lidar to measure water vapor in the atmospheric boundary layer [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 345-356.
- [12] Xie C B, Zhou J, Yue G M, *et al.* New mobile Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1281-1286.
谢晨波, 周军, 岳古明, 等. 新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽 [J]. 光学学报, 2006, 26(9):

- 1281-1286.
- [13] Tian L, Guo S L, Bu L B, *et al.* Stratosphere temperature inversion algorithm of Rayleigh lidar using wavelet-denoising[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 649-654.
田力, 郭胜利, 卜令兵, 等. 利用小波降噪的瑞利激光雷达平流层温度反演[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 649-654.
- [14] Wu S H, Liu Z S, Liu B Y. Enhancement of lidar back scatters signal-to-noise ratio using empirical mode decomposition method[J]. Optics Communications, 2006, 267(1): 137-144.
- [15] Tian P F, Cao X J, Liang J N, *et al.* Improved empirical mode decomposition based denoising method for lidar signals[J]. Optics Communications, 2014, 325: 54-59.
- [16] Yin S H, Wang W R. Denoising lidar signal by combining wavelet improved threshold with wavelet domain spatial filtering[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(12): 694-696.
- [17] Zhou Z R, Hua D X, Wang Y F, *et al.* Improvement of the signal to noise ratio of Lidar echo signal based on wavelet de-noising technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 961-966.
- [18] Liu B N, Huang Q B, Zhang W M, *et al.* Investigation and experiments of wavelet thresholding in ensemble-based background error variance [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(2): 020505.
刘柏年, 皇群博, 张卫民, 等. 集合背景误差方差中小波阈值去噪方法研究及试验[J]. 物理学报, 2017, 66(2): 020505.
- [19] Mao J D, Hua D X, Wang Y F, *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.
- [20] Sun L, Zhang Z L, Tan L L, *et al.* Denoising method of dynamic grating Moiré signal based on wavelet threshold[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 576-580.
孙磊, 张志利, 谭立龙, 等. 采用小波阈值的时变光栅莫尔信号去噪方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 576-580.
- [21] Fang H T, Huang D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform[J]. Optics Communications, 2004, 233(1/2/3): 67-76.