

小波去噪在成像激光雷达仿真信号中的应用

孙国栋^{1,2}, 秦来安^{1*}, 程 知^{1,2}, 侯再红¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘要 通过设计成像激光雷达的各种参数,结合一种大气模式模拟得到了一维激光雷达信号,并根据高斯分布的特点和实测的光束宽度还原了二维光柱图像。对该原始图像加入不同强度的高斯白噪声和一定强度的平均背景,生成类似于成像激光雷达实测信号的染噪图像。使用二维小波变换的方法对染噪的激光雷达光柱图像进行去噪,获得了较好的去噪效果。去噪后的回波信号与原始回波信号之间的相对误差均在 $\pm 12\%$ 以内。利用去噪的激光雷达信号反演出气溶胶的消光系数。将反演出的气溶胶消光系数与输入的大气模式下气溶胶的消光系数进行对比,结果表明二者的相对误差在 $\pm 15\%$ 之内,并且总体变化趋势一致,由此验证了所提出的利用小波对激光雷达染噪图像进行去噪的可行性。

关键词 大气光学; 成像激光雷达; 白噪声; 小波变换; 消光系数

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.090102

Application of Wavelet Noise Reduction for Simulated Signals of Imaging Lidar

Sun Guodong^{1,2}, Qin Laian¹, Cheng Zhi^{1,2}, Hou Zaihong¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract One-dimensional lidar signal is achieved by the simulation combining an atmospheric model and the design of parameters of imaging lidar. A two-dimensional light cross image is recovered based on measured beam widths and features of the Gauss distribution. The noised images similar to the real signals detected by imaging lidar are obtained when we add Gauss white noise with different intensities and certain intensity of average background to the original image. The good de-noising effect is obtained when we denoise the noised lidar light cross image by the two-dimensional wavelet transform method. The relative error between echo signal after denoising and original echo signal is in the range of $\pm 12\%$. The extinction coefficients of aerosol are retrieved with de-noising lidar signals. Comparing extinction coefficients under the input aerosol atmospheric model with retrieved extinction coefficients of aerosol, we find that the relative error is in the range of $\pm 15\%$ and their variation trends are coincident, which verifies the feasibility of the proposed method using wavelet transform in the de-noising for the noised images of lidar.

Key words atmospheric optics; imaging lidar; white noise; wavelet transform; extinction coefficient

OCIS codes 010.1100; 010.1290; 010.3640

收稿日期: 2017-03-06; **收到修改稿日期:** 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(41405014)

作者简介: 孙国栋(1991—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: gds0525@163.com

导师简介: 侯再红(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光大气传输方面的研究。

E-mail: zhhou@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: laqin@aiofm.ac.cn

1 引言

激光雷达具有较高的时空分辨率,广泛应用于大气和环境参量探测中^[1]。从激光雷达方程来看,激光雷达系统的有效探测距离主要受限于信噪比,信噪比会随着探测距离的增加快速下降。提高信噪比和增加有效探测距离的方法之一是提高激光器的功率,但是这种方式只能小幅度提高系统的信噪比。

根据激光雷达回波信号噪声的特点,激光雷达信号噪声的处理中运用了一些数字信号处理算法。Han等^[2]在拉曼激光雷达探测水蒸气廓线中运用卡尔曼滤波器来减小噪声;Wu等^[3]用经验模式分解方法提高了激光雷达后向散射光的信噪比,这种方法可以有效减小大气湍流、背景光以及热噪声等因素的影响。因此,用一些数字信号处理算法可以提取弱信号,这些算法是提高激光雷达系统特性的最经济且有效的方法。

小波分析是一种有效分析信号特性的工具,已被广泛应用于图像处理、语音信号处理、故障诊断及超声波探测等领域。事实上,小波分析克服了传统傅里叶变换的缺点,不仅可以有效地分析信号的整体特性,还可以分析信号的变化规律。一些小波分析方法已被应用于减小激光雷达信号的噪声。Fang等^[4]利用平衡阈值技术有效减小了激光雷达信号的噪声,取得了明显的去噪效果;接着,Fang等^[5]采用基于径向基函数(RBF)神经网络的小波分析算法对激光雷达信号进行了分析;Yin等^[6]采用小波阈值与小波空间滤波器相结合的方法对激光雷达信号进行了去噪。

本文提出用二维离散小波变换结合软阈值的方法对成像激光雷达染噪图像进行去噪处理,通过去噪之后的信号对气溶胶消光系数进行反演,并将反演得出的消光系数与原始模式下气溶胶的消光系数进行对比,验证了所提方法的可行性。

2 二维离散小波变换去噪方法

二维离散小波变换主要用于解决图像二维多分辨率的分析问题,一幅二维离散图像可表示为 $c(m, n)$, 二维离散小波可将其分解为多层不同分辨率情况下的近似分量 cA_j 、水平方向细节分量 cH_j 、垂直方向细节分量 cV_j 和对角线细节分量 cD_j , 其中 j 为分解层数 ($j = 1, 2, \dots$)。分解为两层的小波图像的分解过程如图1所示。通过对原始图像进行分解,获得第一层的近似分量和细节分量;接着对第一层的近似分量进行分解,获取第二层的近似分量和细节分量。两层分解小波图像的重构过程与分解过程相反。大于两层分解的过程与图1所示的分解过程类似,只需将上一层的近似分量不断进行分解。通过对图像分解过程中所产生的近似分量和细节分量系数进行调整,使重构图像满足特定条件,便可实现基于小波变换的图像去噪。

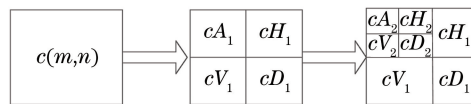


图1 分解为两层的小波图像分解过程

Fig. 1 Decomposition process of wavelet image decomposed into two layers

仿真中选用小波阈值去噪方法^[7],这种方法的重点在于小波基和阈值大小的选取,这里选取的分解层数为3层。对于小波基的选取,理想的小波基应具有以下特点:1) 正交性;2) 紧支性和衰减性;3) 对称性;4) 正则性;5) 消失矩。目前,没有一种小波基对图像的处理效果是理想的。选取 Daubechies (dB_N)小波基, dB_N小波具有较好的正则性,即该小波所引入的光滑误差不易被察觉,使得信号重构所得的信号比较光滑,并且阶次(序列 N)越大,消失矩阶数越大,则光滑性就越好、频域的局部化能力越强、频带的划分效果越好^[8]。目前主要有两种方法用于阈值选取:硬阈值法和软阈值法。两种方法可表示为^[4]

$$W_{H,j} = \begin{cases} \text{sign}(W_{T,jk}) \cdot (|W_{T,jk}| - \mu v) & , |W_{T,jk}| \geq v \\ 0 & , |W_{T,jk}| \leq v \end{cases} \quad (1)$$

式中 $W_{H,j}$ 和 $W_{T,jk}$ 分别为处理前和处理后的小波细节系数; v 为所选择的阈值大小; $\mu = 0$ 时对应硬阈值, $\mu = 1$ 时对应软阈值。选取阈值时依据的方程^[1]为

$$v = \sigma \sqrt{2 \lg n} \quad (2)$$

式中 n 为图像信号的长度; σ 为染噪图像分解得到的每层细节系数绝对值按照从小到大顺序排列后,对其中

值除以 0.6745 所得的值。通常,通过全局阈值法或局部阈值法可去除噪声。全局阈值法在分解的所有层上采用一个固定的阈值处理细节系数,而局部阈值法在不同的层上采用不同的阈值。根据噪声在不同层上细节系数不同的特征,局部阈值法可以在不同的层上选择更加合适的阈值。因此,这里采取局部阈值法。

减小激光雷达仿真图像信号噪声的过程可大致分为 3 步:1) 根据需求选择合适的小波基和分解层数 N , 利用小波变换将原始激光雷达染噪图像分解为 N 层, 得到每层对应的小波系数; 2) 获取每层合适的阈值, 使用软阈值方法, 将每一层的细节系数通过不同的阈值进行量化, 得到新的细节系数; 3) 基于第 N 层的近似系数和所有分解层上被量化后的细节系数, 通过小波逆变换对图像进行重构, 从而得到去噪后的图像。

3 仿真及误差分析

3.1 成像激光雷达装置

成像激光雷达装置的结构示意图如图 2 所示。激光雷达的收发间距为 480 mm。发射装置为连续 YAG 激光器, 波长为 532 nm, 平均输出功率为 4 W, 光束的发散角为 1.5 mrad。激光器发射出的激光经过 10 倍的扩束系统后进入大气。光学接收装置由接收望远镜、干涉滤光片和 CCD 等组成。该装置中的望远镜为透射式望远镜, 口径为 50 mm; 干涉滤光片的中心波长为 532 nm, 带宽为 3 nm; CCD 的水平方向有 1388 个像素, 垂直方向有 1038 个像素; 探测器的型号为 Sony-ICX285, 像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$; 模数转换器位数为 12 位。

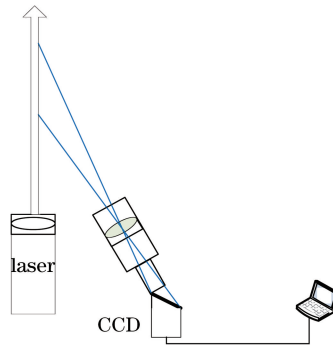


图 2 成像激光雷达结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of imaging lidar

成像激光雷达每个像素单元上的接收光子数为^[9]

$$P(z) = C\beta(z) \frac{\delta z}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right], \quad (3)$$

式中 C 为常数, $\beta(z)$ 为气溶胶和分子的总后向散射系数, $\alpha(z')$ 为气溶胶和分子的总消光系数, z 为高度, δz 为高度分辨率。 δz 与 z 的关系满足 $\delta z = z^2 d\theta/D$, 其中 θ 为散射角, D 为收发间距。由于成像激光雷达的分辨率呈非线性变化, 通过标定关系可以获得高度与像素位置的对应关系^[10], 如图 3 所示。由图 3 可见, 随着高度的增加, 距离分辨率逐渐下降, 这与实际情况是相符的。

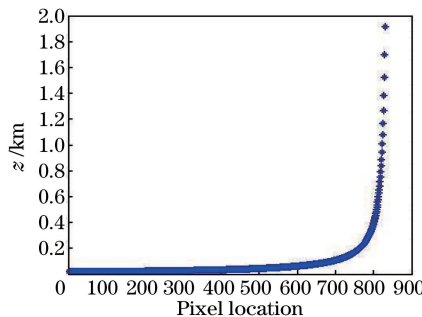


图 3 像素位置与高度的关系

Fig. 3 Relationship between pixel location and height

3.2 仿真结果

为了验证以上方法的可行性,首先对仿真数据进行分析。根据设计需求,为了保证足够高的距离分辨率,暂时获取 2 km 以内的数据。利用(3)式可以模拟出激光雷达在 2 km 以内的回波光子数随高度的变化情况。为了更加接近真实数据,利用文献[11]中报道的大气模型来模拟原始的激光雷达回波信号。激光雷达方程中气溶胶和分子的后向散射系数可分别表示为

$$\beta_a(z) = (2.47 \times 10^{-3}) \exp(-z/2) + 5.13 \times 10^{-6} \exp\{-[(z-20)^2/36]\} \frac{532}{\lambda}, \quad (4)$$

$$\beta_m(z) = 1.54 \times 10^{-3} \left(\frac{532}{\lambda}\right)^4 \exp(-z/7). \quad (5)$$

分子的激光雷达比固定为 $8\pi/3$ sr,气溶胶的激光雷达比选为通用的 50 sr^[12]。将以上参数及距离等其他参数代入激光雷达方程中,得到激光雷达在每个高度上探测到的光子数 $P(z)$ 随距离 z 变化的仿真结果如图 4 所示。

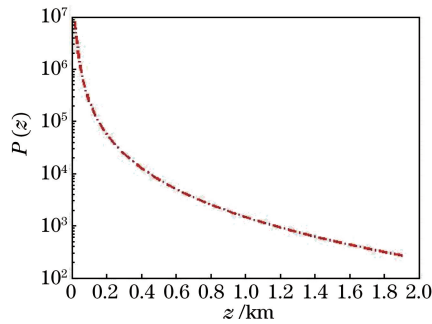


图 4 激光雷达信号随高度变化的仿真结果

Fig. 4 Simulation result of lidar signal versus height

将一维信号按照光束宽度和高斯分布的特点进行还原,得到的原始图像如图 5(a)所示,在原始图像中加入相同的背景光和两种不同方差模型(模型 1 和模型 2)的高斯白噪声,得到的染噪图像分别如图 5(b)、(c)所示。模型 1 的方差光子数为 800,模型 2 的方差光子数为 1600。由图 5 可见,噪声越大,对原始图像的染噪效果越明显。

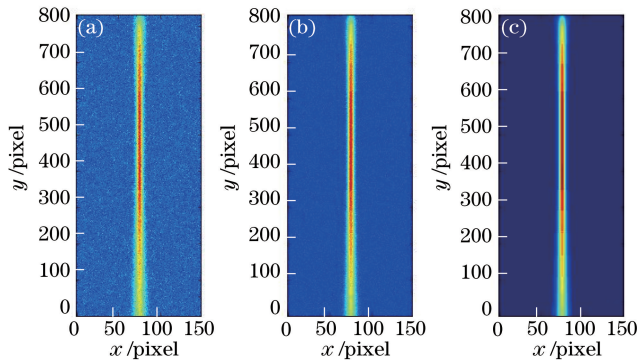


图 5 (a)原始图像;(b)噪声模型 1 对应的染噪图像;(c)噪声模型 2 对应的染噪图像

Fig. 5 (a) Original image; (b) noised image corresponding to noise model 1; (c) noised image corresponding to noise model 2

采用第 2 节介绍的去噪方式,对染噪图像进行去噪,去噪后的图像如图 6 所示,由图可见去噪后图像的信噪比明显得到提高,表明小波去噪效果较好。图 6(a)为加入噪声模型 1 的去噪效果,图 6(b)为加入噪声模型 2 的去噪效果。

去噪效果的数值化可用图像的峰值信噪比(P_{SNR})表示^[13],即

$$P_{\text{SNR}} = 10 \lg \left[\frac{Q^2 mn}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|\mathbf{I}(i, j) - \mathbf{K}(i, j)\|^2} \right], \quad (6)$$

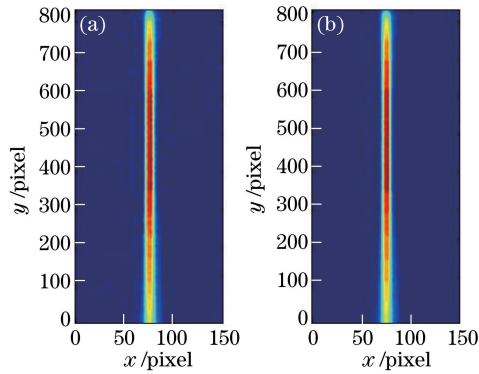


图6 去噪图像。(a)模型1;(b)模型2

Fig. 6 De-noising images. (a) Model 1; (b) model 2

式中 Q 为转化为灰度图像之后灰度的最大值, m 、 n 分别为图像的行、列数, \mathbf{I} 和 \mathbf{K} 分别为原始图像矩阵和去噪后的图像矩阵。两种噪声模式下图像的 P_{SNR} 和去噪之后图像的 P_{SNR} 如表 1 所示。可以看出, 表 1 所示结果与图 6 所得结果一致, 经过去噪处理后, 图像的 P_{SNR} 明显得到提高, 图像质量变好。

表 1 去噪前后图像的 P_{SNR} Table 1 P_{SNR} of images before and after de-noising

Noise model	P_{SNR} of noised image /dB	P_{SNR} of de-noising image /dB
Model 1	18.56	26.12
Model 2	14.26	21.83

提取图 6(a)和图 6(b)中的光柱边界范围, 并对其光柱内的回波光子数进行叠加, 获取去噪之后的激光雷达回波光子数随高度的变化情况。将两种高斯噪声模式下的染噪信号、去噪信号和原始信号进行对比, 对比结果如图 7 所示, 其中图 7(a)对应噪声模型 1 下的情形, 图 7(b)对应噪声模型 2 下的情形。图中的红色虚线为图 4 中仿真条件下通过激光雷达获取的回波光子数随高度的变化, 蓝色实线为经过图像去噪后获取的激光雷达回波光子数随高度的变化, 绿色实线为加入噪声情况下激光雷达回波光子数随高度的变化。对两幅图进行对比可以看出, 加入的噪声方差越大, 在不去噪的情况下得到的回波光子数随高度变化的波动越大, 这与实际情况相符。两种情况下的去噪信号与原始输入信号之间的相对误差曲线如图 8 所示, 其中图 8(a)对应噪声模型 1, 图 8(b)对应噪声模型 2。由图 8 可见, 相对误差均在 $\pm 12\%$ 以内。任何一种去噪方法均无法完全恢复原始信号, 因此认为最大误差在 $\pm 12\%$ 以内是可信的。在真实的情况下, 所能探测到的只有激光雷达方程中左边的一项, 即激光雷达回波信号大小, 此外还需通过激光雷达回波信号对气溶胶的消光系数进行反演。为了验证提出方法的正确性, 以下对比了利用去噪之后的信号反演出的气溶胶消光系数与原始模式下气溶胶的消光系数之间的差异。

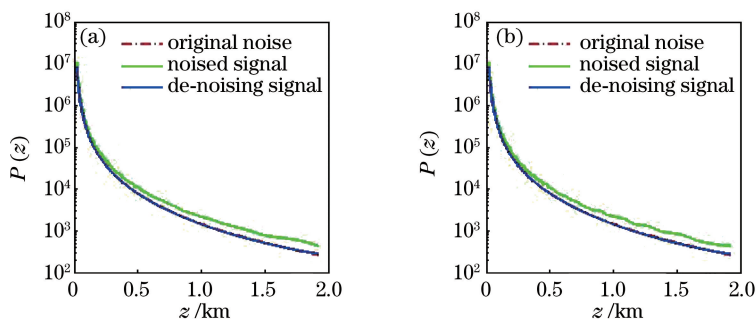


图7 两种噪声模型下的染噪信号、去噪信号和原始信号。(a)模型1;(b)模型2

Fig. 7 Noised signals, de-noising signals and original signals under two noise models. (a) Model 1; (b) model 2

3.3 气溶胶消光系数误差分析

所用的反演方法为一种散射比迭代法^[14], 该方法主要基于 Fernald 后向积分^[15]。通过这种方法反演得

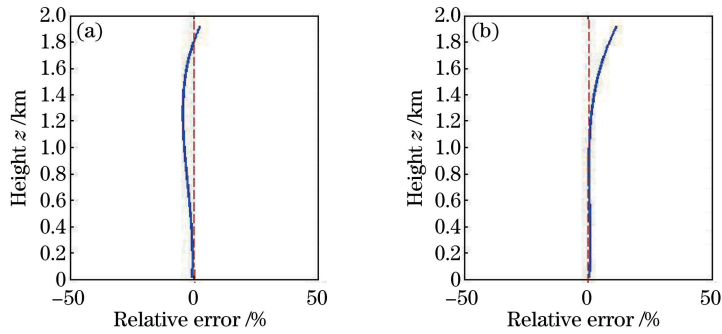


图 8 两种噪声模型下去噪信号与原始信号的相对误差。(a)模型 1;(b)模型 2

Fig. 8 Relative error between de-noising signal and original signal under two noise models. (a) Model 1; (b) model 2

到的气溶胶消光系数与原始模式下气溶胶消光系数的对比图如图 9 所示。图 9 中的黑色线为原始模型下的气溶胶消光系数,红色线为利用噪声模型 1 下去噪信号反演所得的消光系数,蓝色线为利用噪声模型 2 下去噪信号反演所得的消光系数。由图 9 可见,利用两种噪声模型下去噪信号反演所得的消光系数与原始模式下的消光系数相比都有小幅度的波动,并且在远处的波动较为明显,这与图 8 中的去噪信号在远处的波动一致,说明信号的起伏直接决定了气溶胶消光系数的起伏。图 10 为原始模式下的气溶胶消光系数和利用两种噪声模型下去噪信号反演所得的气溶胶消光系数的相对误差,其中红色线为利用噪声模型 1 下去噪信号反演所得的气溶胶消光系数与原始模式下气溶胶消光系数之间的相对误差,蓝色线为利用噪声模型 2 下去噪信号反演得出的气溶胶消光系数与原始模式下气溶胶消光系数之间的相对误差。由图 10 可见,两种噪声模型情况下,利用去噪后的信号反演所得的气溶胶消光系数与原始模式下气溶胶消光系数的相对误差均在 $\pm 15\%$ 之内,因此可认为该去噪方法有效且反演算法切实可行。

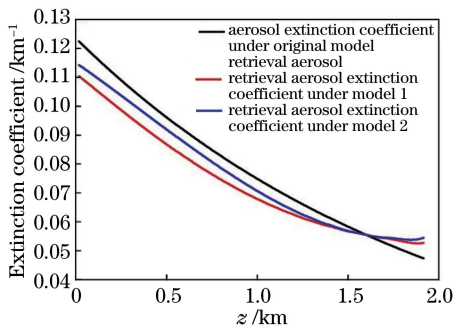


图 9 反演得到的气溶胶消光系数与原始模式下气溶胶消光系数的对比图

Fig. 9 Comparison diagram of retrieval aerosol extinction coefficients and aerosol extinction coefficient under original model

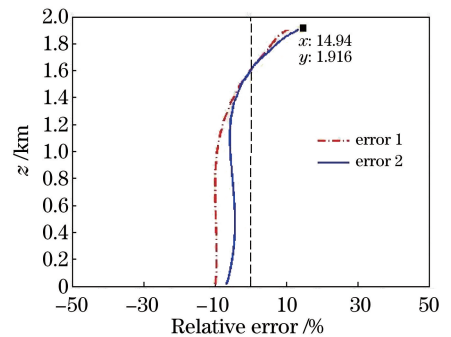


图 10 原始模式下气溶胶消光系数与两组反演出的气溶胶消光系数的相对误差

Fig. 10 Relative error between retrieval aerosol extinction coefficients and aerosol extinction coefficient under original model

4 结 论

将离散小波变换运用于成像激光雷达模拟信号图像去噪过程。通过采用非线性软阈值进行去噪的方法可以有效地去除噪声并且可以较好地保留有用的激光雷达信号。从去噪结果中可以看到,染噪激光雷达信号图像中的噪声去除效果较好,只有很小的起伏。利用去噪之后的激光雷达信号反演得到气溶胶消光系数,并将其与原始模式下的气溶胶消光系数进行对比。对比发现两者的相对误差在 $\pm 15\%$ 之内,且整体的变化趋势一致,从而可以证明所提去噪算法和所采用的反演气溶胶消光系数的算法的可行性。对模拟的成像激光雷达染噪信号图像进行处理,所得结果验证了小波去噪在光柱图像处理中的可行性。下一步工作将采用小波变换对成像激光雷达拍摄到的真实光柱图像进行处理,并且反演出真实的消光系数垂直分布。

参 考 文 献

- [1] Mao J D. Noise reduction for lidar returns using local threshold wavelet analysis[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 202, 43(1/2/3/4/5): 59-68.
- [2] Han Y, Westwater E R, Ferrare R A. Applications of Kalman filtering to derive water vapor profiles from Raman lidar and microwave radiometers[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 480-487.
- [3] Wu S H, Liu Z S, Liu B Y. Enhancement of lidar backscatters signal-to-noise ratio using empirical mode decomposition method[J]. *Optics Communications*, 2006, 267(1): 137-144.
- [4] Fang H T, Huang D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform[J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1): 67-76.
- [5] Fang H T, Huang D S, Wu Y H. Antinoise approximation of the lidar signal with wavelet neural networks[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(6): 1077-1083.
- [6] Yin S R, 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.
- [7] Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0209001.
李庆忠, 刘清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0209001.
- [8] Mao Jiandong, Hua Dengxin, Wang Yufeng, *et al.* Noise reduction in lidar signal based on wavelet packet analysis[J]. *Chinese J 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.
- [9] Barnes J E, Bronner S, Beck R, *et al.* Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2647-2652.
- [10] Mei L, Brydegaard M. Continuous-wave differential absorption lidar[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 629-636.
- [11] Liu Houtong, Chen Liangfu, Su Lin. Theoretical research of Fernald forward integration method for aerosol backscatter coefficient inversion of airborne atmosphere detecting lidar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 064204.
刘厚通, 陈良富, 苏林. Fernald 前向积分用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的理论研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 064204.
- [12] Bao Qing, He Junliang, Zha Yong. Retrieval of aerosol extinction coefficient and optical thickness using varied lidar ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301002.
包青, 贺军亮, 查勇. 基于动态雷达比的气溶胶消光系数及光学厚度反演[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0301002.
- [13] Cai Dunhu. The research on the performance of manifold wavelet basis in image denoising[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003: 12-13.
蔡敦虎. 多种小波基的图像去噪性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003: 12-13.
- [14] Chen Tao, Wu Decheng, Liu Bo, *et al.* A new method for determining aerosol backscatter coefficient boundary value in the lower troposphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1531-1536.
陈涛, 吴德成, 刘博, 等. 低层大气中确定气溶胶后向散射系数边界值的新方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1531-1536.
- [15] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.