

基于独立成分分析的激光回波信号去噪方法

阮俊¹ 杨成武^{1,2} 阚瑞峰^{1*}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

² 合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037

摘要 半导体激光云高仪后向散射信号较弱,同时受到了各种噪声的干扰,因此,如何采取有效措施去除回波信号中的噪声是半导体激光云高仪信号检测的首要任务和难点。根据独立成分分析(ICA)的冗余取消特性,提出利用快速独立成分分析算法对半导体激光云高仪后向散射信号进行去噪。针对快速独立成分分析去噪时需要多元信号的要求,取连续测量的多组回波信号作为观测变量,然后通过快速独立成分分析算法进行信噪分离,得到有效源观测信号,从而实现噪声的有效消除。实验结果表明,该方法能有效去除半导体激光云高仪回波信号中的噪声,在半导体激光云高仪回波信号处理上具有实用价值。

关键词 大气光学;去噪;快速独立成分分析;激光雷达信号;盲源分离

中图分类号 X831.03 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.040101

Denoising Algorithm of Lidar by Fast Independent Component Analysis

Ruan Jun¹ Yang Chengwu^{1,2} Kan Ruifeng¹

(¹ Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

² Electronic Engineering Institute of Hefei, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Because laser diode ceilometer's backscattering signal is weak and easily disturbed by various noises at the same time, the most important task and difficult point for the signal detection of laser diode ceilometer is how to take effective measures to remove the noise in the backscattering signal. In view of the redundancy reduction capability of the independent component analysis (ICA), fast ICA is proposed to eliminate noise of laser diode ceilometer's return signals. Since fast ICA requires multi-channel signals, the continuous multiple groups of laser diode ceilometer return signals are used to construct the multi-channel signals, and then the blind source separation (BSS) of fast ICA is applied to the signals. Thus, the virtual sources are extracted one by one, and the noise embedded in the observed signal is removed. The experimental results demonstrate that the method has good effect on removing the noise from laser diode ceilometer's return signal. Such a fast ICA algorithm has the practical value in processing laser diode ceilometer's return signals.

Key words atmospheric optics; denoising; fast independent component analysis; lidar signal; blind source separation

OCIS codes 010.1290; 010.3640; 010.1615

1 引言

半导体激光云高仪是一种结合了激光技术、光电技术和信号处理技术的主动式观测工具,具有时间和垂直分辨率高、对人眼安全以及易于安装和操作等特点,是一种测云的有效工具^[1,2]。对于以光学作为检测手段的半导体激光云高仪而言,后向散射信号比较弱,且接收的光波不可避免地受到各种噪声的干扰,有时噪声甚至比信号还大,从而降低了有效的探测距离和探测精度。因此,如何采取有效措施去除回波信号中的噪

收稿日期: 2012-10-22; 收到修改稿日期: 2013-01-02; 网络出版日期: 2012-03-05

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项基金(GYHY200706023),国家自然科学基金(61108034)和国家 973 计划前期先导专项(2010CB234607)资助课题。

作者简介: 阮俊(1979—),男,硕士,助理研究员,主要从事环境光谱技术方面的研究。E-mail: ruanjun@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

声是半导体激光云高仪信号检测的首要任务和难点。

在对半导体激光云高仪回波信号进行去噪时,首先要解决的关键问题就是对噪声特性进行分析。只有了解噪声的性质,才能确定用什么样的方法来更好地去噪。影响半导体激光云高仪回波信号检测的噪声有很多,主要包括接收机的背景噪声、探测器噪声以及信号本身的统计噪声等。其中背景噪声可以通过使用带通滤波器等硬件方法去除,探测器噪声以及信号本身的统计噪声都可归一化为白噪声,而且由于这两种噪声之间相互独立,在一定条件下它们的叠加和近似服从高斯分布。

为了从接收到的激光雷达后向散射信号中滤除噪声而提取出有效源信号,多年来发展了很多技术,如相干平均法^[3]、小波变换法^[4]等。但是,对于半导体激光云高仪而言,在实际使用过程中这些方法的去噪效果均不太理想。独立成分分析(ICA)是近30年来逐渐发展起来的一种盲信号分离方法,该方法是一种统计方法,目的是从传感器收集到的混合信号中分离出尽可能相互独立的源信号。同时,独立成分分析也是一种有效的冗余取消技术,通过该方法可以有效地去除信号的冗余部分,对含有高斯白噪声的信号具有较强的去噪能力。因此本文尝试利用该方法对噪声污染的半导体激光云高仪后向散射信号进行去噪研究。

2 独立成分分析去噪原理

2.1 含噪 ICA 的数学模型

假设 $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 为 m 维观测向量,其元素是各个传感器的输出。 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$ 为 n 个源信号构成的 n 维向量,且它们之间相互统计独立。则含噪盲信号分离可用下式描述:

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T = \mathbf{A} \cdot [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t),$$

式中矩阵 \mathbf{A} 中的元素表示信号的混合情况,称为混合矩阵, $\mathbf{n}(t)$ 为 m 维加性噪声,且有 $m \geq n$ 。

含噪盲信号分离原理为:在源信号和混合矩阵 \mathbf{A} 未知情况下,只根据 m 维观测向量 $\mathbf{X}(t)$ 得到分离矩阵 \mathbf{W} ,然后通过 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{X}(t) = \mathbf{W}\mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(t) + \mathbf{W}\mathbf{n}(t)$ 计算得到的输出是源信号向量 $\mathbf{s}(t)$ 的估计。

独立分量分析算法是基于时序的、统计的分离方法,当源信号独立或近似独立时均能被很好地恢复,而且采用该算法另一优势是不需要源信号的先验知识,因此在冗余取消和降噪方面受到了广泛关注。由于构成观测信号的真实信号和噪声在时间上相互独立,因此利用 ICA 在去噪上具有很好的处理效果。迄今为止,已经出现了很多 ICA 算法^[5~9],本文重点研究快速 ICA 算法。

2.2 快速 ICA 算法去噪处理流程

快速 ICA 算法^[8,9]也称快速固定点 ICA 算法,其本质是一种最小化估计成分互信息的神经网络方法,利用最大熵原理来近似负熵,且通过一个合适的非线性函数 G 使其达到最优。它是一种快速收敛、稳健的离线批处理算法。该算法所基于的判据是负熵最大化。

根据半导体激光云高仪回波信号的特点,这里非线性函数取 $G(y) = -\frac{1}{a} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)$ 。

利用快速 ICA 算法对半导体激光云高仪回波信号进行去噪的具体处理过程为:

- 1) 获取半导体激光云高仪后向散射回波信号;
- 2) 采用快速 ICA 算法对半导体激光云高仪后向散射回波信号进行分解,这里用 \mathbf{X} 表示原始信号, \mathbf{W} 表示解混矩阵, \mathbf{Y} 表示通过快速 ICA 算法逐个分离出的独立分量;
- 3) 对于以上分解出的独立分量,根据激光雷达信号的时域及频域等先验知识,进一步识别出有用信号和噪声,然后在此基础上把 \mathbf{Y} 中属于噪声的分量置零,最后根据 $\mathbf{X} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{y}$ 反求得到 \mathbf{X} ,即为去除了噪声的原始信号。

3 仿真与讨论

为验证本文提出的快速 ICA 算法对半导体激光云高仪回波信号降噪处理的有效性,首先对包含高斯白噪声的信号进行了仿真计算。在使用快速 ICA 去噪时,必须满足观测变量的个数大于或等于独立源个数的条件,而此处在处理一维加噪观测时,需要引入虚拟观测将一维扩展为多维观测。这里选取所加的噪声信号作为虚拟观测信号,它和待处理的染噪信号共同组成一个二维观测信号。

半导体激光云高仪后向散射回波信号从某种程度上可以看作是高频信号与低频信号的叠加,其中回波

信号中的各种噪声信号属于高频信号,而低频信号则主要是由不同高度处大气气溶胶粒子引起的。因此,根据激光云高仪大气气溶胶后向散射信号和噪声信号的特点,在 Matlab 中采用 Donoho 和 Johnstone 的测试信号 Bump 叠加高斯白噪声作为仿真信号,然后利用快速 ICA 算法对其进行去噪处理,结果如图 1 所示。

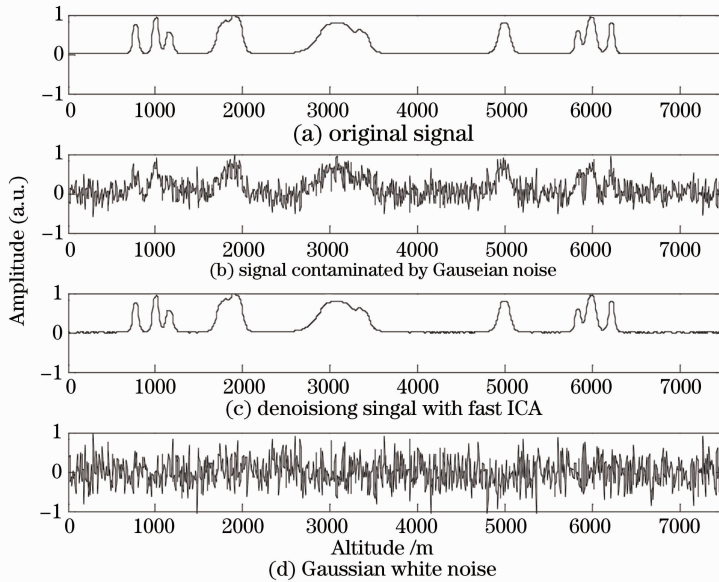


图 1 快速 ICA 算法对输入信噪比为 1 的含高斯白噪声信号消噪的效果

Fig. 1 Denoising effect of fast ICA method under signal contaminated by Gaussian white noise with signal-to-noise ration (SNR) of 1

从图 1 可以看出,快速 ICA 算法的消噪效果非常好,去噪后的信号与原始信号基本一致,而且保持了输入信号脉冲的起始点和极值点、相对幅值以及脉冲宽度大小,未产生失真或延迟,尤其是对幅值和脉宽较小的脉冲信号仍然具有较强的还原能力,这对于半导体激光云高仪的云层识别具有非常重要的意义。一方面随着半导体激光云高仪探测高度的升高,回波信号会越来越弱,另一方面天空中存在着各种类型的云层,有时比较薄。对这两种情况下的云层识别采用传统方法非常困难,而利用该算法却能有效去除噪声而识别出云层信息来。

此外,为了评价去噪算法的优劣和去噪效果的好坏,除了用肉眼主观观察外,可以采用输出信噪比 (SNR) 和均方根误差 (RMSE) 两个指标来进行评价。均方根误差反映了估计值和实际值的相似程度,其值越小相似程度越高;而信噪比反映了信号的感知质量。各评价指标定义为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^n S^2(n)}{\sum_{n=1}^n [S'(n) - S(n)]^2}, \quad (1)$$

$$E_{RMS} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n [S'(n) - S(n)]^2, \quad (2)$$

式中 $S(n)$ 为原始信号, $S'(n)$ 为去噪后的信号, n 为信号长度。

为了评价快速 ICA 算法消噪的有效性,计算了输入信噪比为 1 时的含噪信号消噪后的信噪比和均方根误差,表 1 为计算结果。可以看出,快速 ICA 算法具有很好的消噪效果,经过去噪后信噪比明显提高,均方根误差则明显减小,且没有出现延迟或失真。

表 1 使用快速 ICA 对含噪信号进行消噪后的信噪比和均方根误差

Table 1 Results of RSN and RMSE after denoising the signal with noise by fast ICA

SNR	99.9109	99.9253	99.9173	99.9163
RMSE / 10^{-6}	5.1898	5.1824	5.1865	5.1870

4 实验结果分析

在使用快速 ICA 去噪时,必须满足观测变量的个数大于或等于独立源的个数的条件,而半导体激光云高仪回波信号主要包括大气气溶胶信号和高斯白噪声,因此可认为这里的独立源主要有 2 个。此外,由于半导体激光云高仪发射激光脉冲的时间间隔非常短,而相邻脉冲时间的回波信号变化起伏不大,因此这里取连续的 3 组半导体激光云高仪回波信号作为观测变量进行快速 ICA 分析。基于快速 ICA 的观测信号去噪的过程框图如图 2 所示。

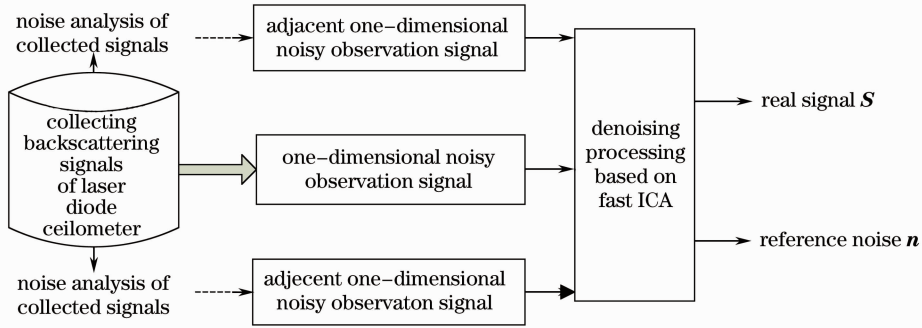


图 2 基于快速 ICA 的信号去噪框图

Fig. 2 Block diagram of denoising based on fast ICA

图 3(a)~(c)为半导体激光云高仪于 2011 年 1 月 4 日探测得到的未经过距离平方校正的连续三组回波信号廓线。该激光器波长为 905 nm,工作模式为脉冲,脉冲宽度为 30~110 ns 可调,重复频率为 10 kHz。从图中可以看出,半导体激光云高仪后向散射信号比较弱,且受到噪声的严重干扰,近距离的信号由于镜面反射噪声的存在使得信号起伏较大,随着距离越来越远,回波信号的细节信息逐渐被噪声淹没,因此很难从原始信号直接地确定云层信息。所以要想准确提取出云层信息,必须首先对半导体激光云高仪回波信号进行消噪处理。

下面用快速 ICA 算法对半导体激光云高仪后向散射信号进行消噪处理,图 3(d)是运行快速 ICA 算法后分离出来的有用回波信号,图 3(e)为运行算法后分离出来的高斯白噪声。从图中可以看出,与前面的仿

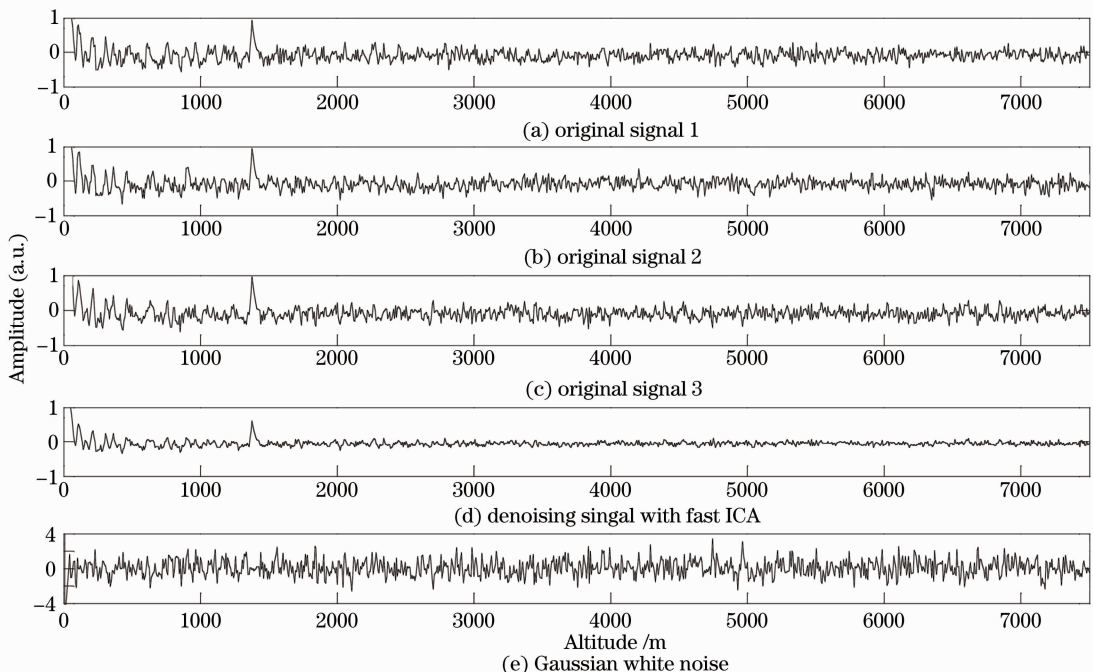


图 3 基于快速 ICA 算法的半导体激光云高仪回波信号的去噪结果

Fig. 3 Denoising results of laser diode ceilometer's return signal based on fast ICA

真信号去噪结果相比,虽然去噪后得到的有用信号曲线相对较为粗糙,且仍有一些小的起伏,其中除了有用信号外还有一些不能去除的非高斯白噪声,但是总的来说去噪后信噪比明显提高,此时可以较为容易地识别出云层信息,最重要的是在利用快速ICA去噪的同时较好地保持了云层脉冲信号的细节信息,如1350 m附近的云层脉冲信号对应的脉宽大小、起止点和极值点对应的时间点均与原信号基本一致,未产生明显的失真或延迟,这样通过快速ICA去噪后能够更加容易且准确地提取出云层信息来。因此,快速ICA算法在半导体激光云高仪回波信号降噪处理上具有非常重要的应用价值。

5 结 论

提出了基于快速ICA的半导体激光云高仪去噪新方法,以实现强噪声背景下半导体激光云高仪微弱信号的精细提取。仿真与实验结果证实了这种方法不仅实现简单,而且不管是脉冲宽度窄的信号还是距离远的微弱信号,经过快速ICA去噪后,在信噪比得到明显提高的同时有用信号未出现延迟或失真现象,这对于半导体激光云高仪云高云厚信息的准确提取具有非常重要的意义。其结果对后期的云层信息的准确提取具有重要的实用价值。

此外,实验结果进一步说明:与传统的多脉冲回波信号累加、背景信号直接去噪方法相比,该算法对于含有高斯白噪声的含噪信号具有较强的去噪能力,而且采用该算法的明显好处是不需要源信号的先验知识,也不需要特定的前提假设,只要源信号独立或近似独立,那么均能得到很好的恢复,而半导体激光云高仪后向散射回波信号和噪声在时间上是互相独立的,因此快速ICA具有很好的去噪效果。

参 考 文 献

- 1 Yang Chengwu, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Automatic inversion algorithm of cloud cover of laser ceilometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(3): 030102
杨成武, 刘文清, 张玉钧. 激光云高仪云量自动反演算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(3): 030102
- 2 Mao Feiyue, Gong Wei, Li Jun *et al.*. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3097~3102
毛飞跃, 龚威, 李俊等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3097~3102
- 3 Hu Guangshu. Digital Signal Processing: Theory, Algorithm and Implementation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 11~12
胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 11~12
- 4 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
- 5 P. Comon. Independent component analysis-a new concept[J]. *Signal Processing*, 1994, **36**(3): 287~314
- 6 A. Hyvarinen, E. Oja. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. *Neural Component*, 1997, **10**(7): 1483~1492
- 7 Aapo Hyvarinen. Independent component analysis: algorithms and application [J]. *Neural Networks*, 2000, **13**(5): 411~430
- 8 Te-won Lee. Independent Component Analysis: Theory and Application[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998. 42~65
- 9 Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing [M]. Ruan Qiuqi *et al.* Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2004. 311~356
拉菲尔·冈萨雷斯, 理查德·伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦等译. 北京: 电子工业出版社, 2004. 311~356