

文章编号: 1001-3806(2014)05-0599-04

一种用于激光雷达信号的自适应分段平滑算法

王玉诏

(北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 为了抑制米散射大气探测激光雷达回波噪声引起的信号随机波动, 采用新设计的自适应分段平滑方法对信号进行平滑处理。根据激光雷达信号特性, 信号有效变化幅值大于信号背景噪声波动。以背景噪声标准差的若干倍表示信号的噪声幅度。按照相邻信号幅值差与噪声幅度的对比, 可以确定信号发生有效变化的位置, 这些位置可以作为信号分段端点, 在分段端点内用滑动平均可以实现对信号的自动分段平滑。用实测微脉冲激光雷达信号对方法进行了验证, 并与常用固定分段平滑方法进行了对比。结果表明, 自适应分段平滑方法可以根据信号变化的剧烈程度自动选择平滑窗口大小, 在对噪声进行有效抑制的同时, 避免平滑过度造成的信号畸变。

关键词: 大气光学; 激光雷达; 平滑; 自适应; 分段

中图分类号: TN958.98; TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.005

An adaptive segment smoothing algorithm for lidar signal

WANG Yuzhao

(College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to suppress the random signal fluctuations caused by the echo noise of Mie scattering atmospheric probe laser radar, a new adaptive segmentation smoothing method was designed to smooth the signal. According to the characteristics of lidar signal, the effective changing amplitude of the signal is greater than the change of background noise. The amplitude of the signal noise could be expressed by several times of the standard deviation of the background noise. After comparing the amplitude difference of the adjacent signal with the noise amplitude, the effective position of signal change was determined. These positions could be recorded as the segmental endpoints of the signal. The common moving average algorithm was applied to each segment of the lidar signal. The method was examined by using the actual micro pulse lidar signal and compared by the common fixed segment algorithm. The results show that the adaptive segment smoothing method can choose the size of the smoothing window automatically according the intensity of the signal change. The noise is suppressed effectively and the signal distortion caused by excessive smooth is avoided.

Key words: atmospheric optics; lidar; smooth; adaptive; segment

引 言

作为主动遥感设备, 米散射激光雷达凭借其高时间和空间分辨的特性, 已越来越多地被用于云和气溶胶等大气参量的观测, 在气候、气象、环境等领域提供了大量数据^[1-6]。用于大气探测的激光雷达, 其信号来自于大气粒子对激光的后向散射^[7-8]。接收系统仅能接收到散射信号中很少的一部分, 造成

激光雷达回波信号十分微弱。该弱信号会受到天空背景光、光电探测器中暗电流噪声及热噪声等影响, 形成大量的噪声波动^[1-4]。为了提高反演精度, 在反演之前要对信号进行平滑, 所用方法包括: 滑动平均、小波去噪^[9]、经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)算法^[10]、半步长插值迭代法^[11]等。由于其它算法存在适用性和算法效率的问题, 最常用方法为分段滑动平均法, 即基于激光雷达信号随距离平方衰减的特性及应用经验, 按照距离将信号分为几段, 再分别用不同的窗口对各段进行平滑。该方法计算简便快捷, 能起到一定的平滑效果。但是固定的分段及窗口选择往往不能适应激光雷达信号的剧烈变化。例如对于 1 台激光雷达在特定时、空分辨率的情况下, 根据经验将高度 3km 以上

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2012AA120901)

作者简介: 王玉诏 (1984-), 男, 讲师, 现主要从事大气探测激光雷达系统设计及数据反演的研究。

E-mail: zz0525wyz@163.com

收稿日期: 2013-09-16; 收到修改稿日期: 2013-12-11

的米散射信号平滑窗口设为 1km 时,对于衰减较强的信号该窗口一般可以起到较好的效果,但是一旦有较强的气溶胶层或云层,就会出现过度平滑导致反演结果失真。尤其当出现云层与大气粒子层交界的情况时,过度平滑会导致云底识别误差。相反,窗口设置过小,较弱的信号也得不到很好的平滑,导致信噪比过低。

针对以上问题,作者提出一种根据激光雷达信号变化进行分段平滑的自适应平滑方法。首先根据背景噪声的标准差估计探测时的噪声水平;对信号随距离的变化进行评估,如果相邻距离信号变化大于估计的噪声,则视为变化有效;将信号变化有效的点作为分段端点。以信号变化端点进行分段,在段内进行多点平滑以保留信号有效趋势。通过该方法,可在信号变化平缓部分分段较宽,而在信号变化剧烈部分分段较窄,进而实现信号的自适应分段。通过对各段内的滑动平均,可使信号在信噪比较低部分得到较大程度的平滑,在信噪比较高部分保留信号波动,同时保存了强弱信号交界部分的突变特性。

1 自适应分段平滑算法

根据上面所述原理,本算法分为以下 3 个步骤:分段、平滑和迭代。

1.1 分段

如流程图 1 所示。设原信号数据为数列 $\{S(i)\}$, $(i=0,1,2,3,\dots,M)$,其中 M 为信号数据个数。与每个信号数据点对应的噪声数列为 $\{N(i)\}$ 。对于未进行距离校正的信号,噪声可以根据远距离背景噪声信号的标准差 σ 的若干倍数计算得到,对于进行了距离校正的信号则可以用噪声乘以距离的平方得到。令阈值变量 $i=0, j=0, K(0)=1, W=S(0)$ 。

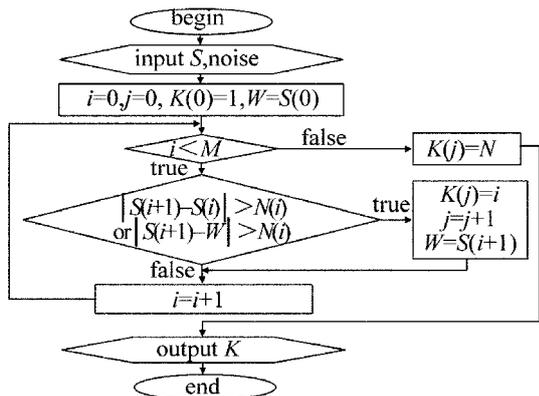


Fig. 1 Schematic diagram of the segmentation

遍历数列 $\{S(i)\}$, 当 $|S(i+1) - S(i)| > N(i)$ 或 $|S(i+1) - W| > N(i)$ 时,认为信号出现有效变化,将 $1 \sim i$ 定为第 1 段。记录下此时的信号位置 $K(j) = i$, 并令 $W = S(i+1)$ 。按照同样的方法,从 $i+1$ 开始遍历原数列依次寻找有效变化并记录下位置。此时,数列 $\{1, K(1), K(2), \dots, K(e)\}$ 即构成了原数据的分段点, $K(e)$ 为端点个数。

1.2 平滑

在各段内利用较大的窗口进行滑动平均即可实现对原数据的平滑(平滑窗口可设为该段的半长)。对于激光雷达信号,可以先对数据进行初步平滑(如 3 点、5 点平滑等),再进行上述分段平滑过程,以抑制段间端点的翘起。通常滑动平均会遇到边界问题,通过大量的试验证明可以通过扩展分段进行抑制。即遍历分段端点 K , 如果 $K(j)$ 和 $K(j+2)$ 之间数据 S 最大变化小于 $D \cdot N(K(j+1))$ (D 为阈值系数,为正值,可根据信号特点通过敏感性分析确定,本文中 $D=3$), 则可以将两端点内的数据连成一段,对 $S(K(j))$ 到 $S(K(j+2))$ 之间的数据进行平滑。这里设置条件 $D \cdot N(K(j+1))$ 是为了避免出现突变信号时将突变点进行平滑,使信号失真。

1.3 迭代

当信噪比较低的信号平滑效果不理想时,可以对以上过程进行若干次迭代,迭代可以得到更好的平滑效果,同时,不影响有效的信号波动。根据经验,迭代一次的效果即可满足需求,迭代次数过多会使信号发生一定的畸变。

通过以上的过程就可以实现自适应分段平滑。自适应分段后,在段内进行数据平滑可以有效去除由于噪声引起的信号抖动。与此同时,出现有效变化的数据点不会受到其它有效信号的干扰,保证了信号有效变化甚至突变的保存。相对于频域滤波的方法,在处理信号突变时不存在扰频的现象。相对于一般的滑动平均或分段平滑,该方法可以根据信号特点进行自适应的平滑。

在实际应用中,由于受到不同大气条件的影响米散射激光雷达信号存在较大的变化。当混合层气溶胶含量较大时,较强的衰减将导致远距离信号较弱,提高噪声的影响。这时需要对激光雷达的远距离弱信号进行较大程度的平滑。而此时若在该距离中出现云层或强气溶胶层,则会使平滑结果产生畸变,与原信号发生较大的偏离。这时自适应的分段平滑算法就能起到自动区别强弱信号的作用。在去

除噪声波动的同时,保留有用的云层或气溶胶层分布信息。

2 实验及讨论

对于激光雷达信号,其噪声水平可以通过远距离信号来估计。一般认为有效距离 R_0 之外的信号为背景噪声,计算该段背景信号的标准差 σ ,根据经验对噪声水平进行估计。对于要处理的信号,估计噪声水平为 $O \cdot \sigma$, O 为噪声系数。设原信号为距离校正后的信号,则对应激光雷达探测距离 R 的噪声估计为 $O \cdot \sigma \cdot R^2$ 。用微脉冲激光雷达实测的一组数据对上述平滑算法进行实验。首先进行自适应分段处理,结果如图2所示, S 表示原数据, S_c 表示自适应分段端点的连线。从结果可以看出,在信号变化平缓的区域,如3.5km到4.5km之间信号变化较平缓的区域分段较宽为1km,而4.5km~5km之间信号变化较快,因此分段较密段长较窄。

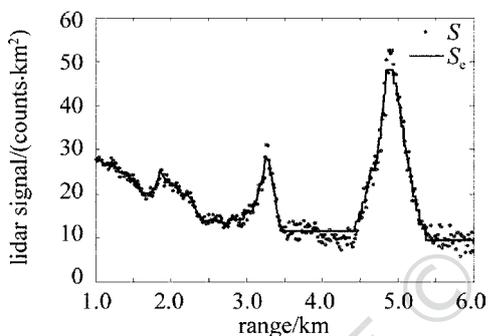


Fig. 2 Results of adaptive segmentation

根据该分段结果在各段内进行平滑的结果见图3。图3中, S 为原数据, S_f 为固定分段平滑结果, S_a 为自适应分段平滑数据。图3a为固定分段平滑与原数据的比较。固定分段标准为:1km~4km选择窗口0.3km;4km~8km选择窗口1.5km;8km以上选择窗口3km。由图中结果可知,1km~4km之间信号实现了有效平滑,且除3.3km外平滑信号无明显畸变,而4km~8km之间出现了强烈的云散射信号,这时固定分段平滑不能作出相应的反应,因此在5km处出现了明显的畸变。图3b为自适应分段平滑结果与原信号比较。由于原信号噪声波动较大,在处理前进行7点平滑,令噪声系数 $O=5$,按前面所述进行自适应平滑处理。根据对比可知,新方法不但在6km~10km的低信噪比处实现了有效的平滑,而且在3.3km和5km处的高信噪比处实现了有效的无畸变平滑。与固定分段平滑相比,该方法可以自适应地处理激光雷达信号噪声,实现信号的

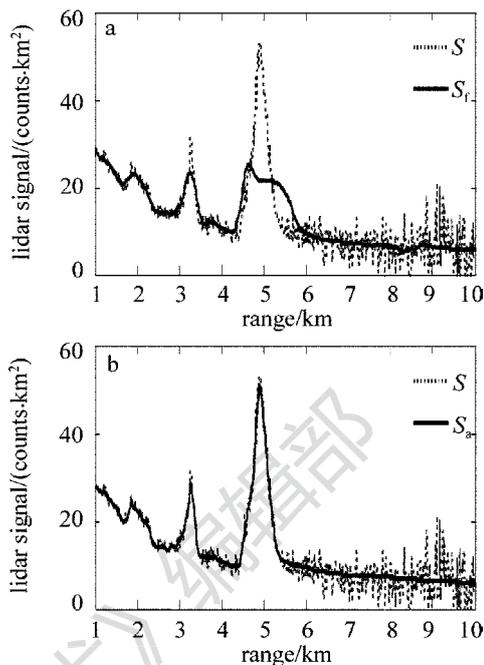


Fig. 3 Comparison of the fixed segment smooth and the adaptive segment smooth
a—the fixed segment smooth b—the adaptive segment smooth

自适应平滑。

根据参考文献[12]中的信噪比算法,对激光雷达信号的信噪比的估算结果见图4。其中, R_0 表示原始信号信噪比, R_s 表示平滑结果信噪比。从图4中后向散射信号对比可知,自适应平滑算法对原信号进行了有效平滑。从信噪比结果对比可知,平滑算法对较强信号影响不大,而对受噪声影响较大的弱信号,可以显著提高信噪比。

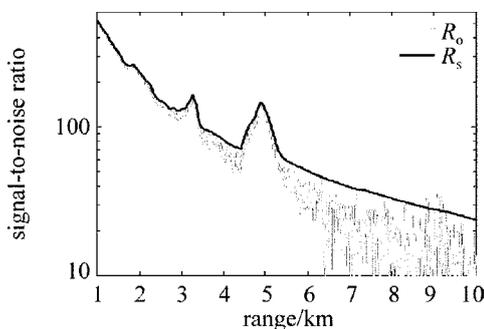


Fig. 4 Improvement of signal-to-noise ratio by using the new method

3 结论

提出了根据噪声对激光雷达信号进行自适应分段平滑的方法,介绍了分段平滑的具体流程及算法设计的依据。通过对实际数据的处理及与固定分段平滑的比较,证明了自适应分段平滑算法在完成数据平滑的同时,还可以保留原数据的有效波动,因而

比固定分段平滑更适合于激光雷达信号的处理。通过对信噪比的分析,证明该算法可以大幅度提高弱信号信噪比。

参 考 文 献

- [1] DAI Y J. Principle of lidar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002:3-10(in Chinese).
- [2] MEASURES R M. Laser remote sensing: fundamentals and applications[M]. New York, USA:Wiely, 1984:5-8.
- [3] EARRETT E W, BEN-DOV O. Application of the lidar to air pollution measurements[J]. Journal of Applied Meteorology,1967,6(3):500-515.
- [4] BENISTON M, WOLF J P, BENISTON-REBETEZ M, *et al.* Use of lidar measurements and numerical models in air pollution research [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1990, 95(D7):9879-9894.
- [5] LIU J J, ZHENG Y F, LI Zh Q, *et al.* Seasonal variations of aerosol optical properties, vertical distribution and associated radiative effects in the Yangtze delta region of China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012,117(D16): D00K38.
- [6] BO G Y, ZHONG Zh Q, WANG B X, *et al.* Retrieval of aerosol and cloud optical parameters based on Raman lidars[J]. Laser Technology, 2012,36(5):597-601(in Chinese).
- [7] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984,23(5): 652-653.
- [8] REAGAN J A, MCCORMICK M P, SPINHIRNE J D. Lidar sensing of aerosols and clouds in the troposphere and stratosphere[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(3): 433-448.
- [9] ZHANG H Y, FAN G H, ZHANG T H, *et al.* Research on wavelet denoising for echo signal of lidar[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012,31(5):52-55(in Chinese).
- [10] TAO X H, HU Y H, LEI W H, *et al.* Application of empirical mode decomposition in atmospheric echo processing of lidar[J]. Laser Technology, 2008,32(6):590-592(in Chinese).
- [11] WANG Y Zh, ZHANG Y Ch, CHEN S Y, *et al.* Half-step interpolation iteration method for smoothing lidar echo[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2011,31(12):1424-1426(in Chinese).
- [12] WU D Ch, LIU B, CHEN T, *et al.* The method to estimate the ratio of laser radar echo signal[C]//Album of 2009 Fifth Session of Jiangsu and Anhui Two Province Atmosphere Detection, Remote Sensing and Electronic Technology Symposium on Environmental. Yangzhou: Jiangsu Province Meteorological Society, 2009:12-15(in Chinese).