

用于激光云高仪的微分增强云检测方法

卜令兵, 庄一洲, 徐中兵, 丘祖京, 邵楠清, 吕敏, 张强

(南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 激光云高仪是对大气中云的时空分布进行自动连续监测的有力工具之一, 现有的云检测算法在低信噪比或有气溶胶影响时容易产生误判或漏判。文中分析了激光云高仪回波的原始信号、一阶微分信号和二阶微分信号特征, 构造了两个新的信号序列, 提出了一种微分增强云检测方法。该方法可以实现对云回波信号中云峰和云边界特征的增强和分离, 有效修正了低信噪比和气溶胶层对云检测带来的误差。通过实验对比了微分增强法和微分零交叉法的云检测结果, 结果表明: 微分增强法在不影响云高判别的情况下, 能有效地减少云的漏判和误判。

关键词: 微分增强法; 云检测; 激光云高仪

中图分类号: P413 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2226-05

Differential enhancing method of laser ceilometer for detection of cloud

Bu Lingbing, Zhuang Yizhou, Xu Zhongbing, Qiu Zujing, Shao Nanqing, Lv Min, Zhang Qiang

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Laser ceilometer is one of the most powerful instruments to monitor the spatial and temporal distribution of cloud automatically and uninterruptedly. For the reason of algorithm, low signal-to-noise ratio and existence of aerosol layer may lead to inaccuracy during cloud observation. Based on the analyses to raw signal, differential signal and second-order differential signal, the differential enhancing method for detection of cloud was presented as well as the construction of two new signal series. The new method could realize the enhancement and separation of the signal feature of cloud peak and boundary and results in reduction of influence of low signal-to-noise ratio and existence of aerosol layer. Comparison experiments using both the differential zero-crossing method and the differential enhancing method were conducted. The results show the differential enhancing method can reduce the rates of missing judgement and misjudgement while has no influence to the judgement of cloud heights.

Key words: differential enhancing method; cloud detection; laser ceilometer

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(40805016); 国家级大学生创新训练项目(20120300003)

作者简介: 卜令兵(1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事大气激光探测方面的研究。Email: lingbingpu@gmail.com

0 引言

云是指由大气中悬浮的小水滴、过冷水滴、冰晶或它们的混合物组成的底部不接触地面的可见聚集体,是影响地球辐射收支平衡的重要因素,同时也是大气中运动过程的具体表现,预示着未来天气的变化,因此云的观测在气象科研中有着十分重要的地位。在目前的气象观测业务中,云的观测是一项重要项目,观测方式主要靠人工观测,但人工观测又存在主观性强、准确率差等缺点,因此,中国气象局已经考虑使用激光云高仪代替人工观测,并进行了前期的仪器考核。激光云高仪实质是一种发射功率比较低的激光雷达,由于云体内部有较多的水分子(三种相态均有可能),当激光到达云体后,激光云高仪接收到的回波功率将会突然增强^[1]。采取一定的算法提取出回波功率突然增强的高度即为云底高度,因此,云高提取算法的效果直接影响云高探测的准确度。

对激光云高仪回波信号进行云检测的算法主要有阈值法^[2]、微分零交叉法^[3]、滑动窗口积分算法^[4]、Klett法^[5]等。阈值法是通过对比原始信号与理想的无云信号来检测云层,但由于激光发射功率的不稳定、白天太阳光背景的干扰及气溶胶浓度日变化等因素造成的平均噪声不稳定性,也使得在实际应用中阈值的设定、计算或调整比较复杂,漏判或误判的可能性相对较大。微分零交叉法通过在原始信号的一阶微分信号中寻找交叉零点来检测云层,但实际上由于噪声或云层和气溶胶层的垂直不均匀性等因素影响,一阶微分信号上的零点可能有很多,直接应用该方法也有一定误差。滑动窗口积分算法通过移动窗口区间并计算窗口内的信号积分值来提取云层信息,但窗口宽度的设定本身对结果影响也比较大,且积分本身也使空间分辨率降低。Klett法是从原始信号中反演出气溶胶消光系数,再用消光系数代替原始信号进行云高计算的方法,但气溶胶消光系数的反演过程中所使用的一些假设条件实际上也会给云检测带来一定的误差^[6]。

文中在分析了激光云高仪回波的原始信号、一阶微分信号和二阶微分信号的基础上,构造了两个新的信号序列,提出了一种用于云高检测的微分增强法,最后通过实验对比微分零交叉法和微分增强法的云检测结果。

1 微分增强算法

1.1 回波信号分析

如图1所示,图(a)~(c)分别是激光云高仪的原始回波信号及其对应的一阶微分信号和二阶微分信号。 z_0 高度以上原始信号满足激光雷达方程随高度上升而衰减,以下的信号不满足距离衰减是由几何重叠因子造成的^[7]。高度 z_m 处原始信号的强回波则是云对激光的强后向散射造成的, z_0 和 z_1 分别是其云底高度和云顶高度。可以看出一个典型的云回波在一阶微分信号上对应于一组相邻的波峰和波谷,其与高度轴的三个交点(零点)从下往上可分别对应云底高度 z_0 、云峰高度 z_m 和云顶高度 z_1 。而在二阶微分信号上,则可以看出云峰对应于一个负极值,而云底和云顶附近则是两个正极值,较准确的云底和云顶高度分别在两个正极值临近的两个零点处。云层在二阶微分信号中的这种特征是因为对于光学散射性质具有突变性的云边界以及处于极值位置的云峰来说,它们经常也是信号曲线斜率变化最明显的位置,从下往上来看,云底和云顶附近是斜率突增区,云峰附近是斜率突减区。而对于气溶胶层,由于其斜率突变性不明显,在二阶微分信号上的表现将远不如云层显著,这样同时也可以实现对云层和气溶胶层的有效区分。

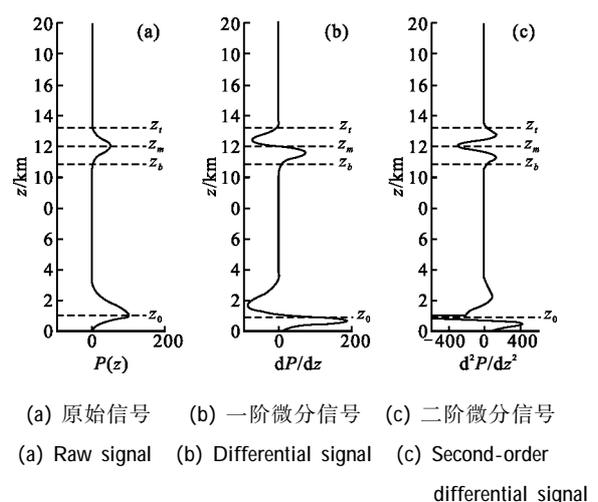


图1 回波信号特征

Fig.1 Features of backscattered signal

1.2 微分增强法

在二阶微分信号中,云峰和云边界的特征都以

较大的幅值被分别反映到了负值区和正值区中去,因此,基于这种信号特点,通过对二阶微分信号正负值分离的方法实现对云峰和云边界信号特征的分离。同时考虑到原始信号和一阶微分信号的幅值也分别反映了云峰和云边界的特征强度,因此把二阶微分信号的正值区与一阶微分信号相乘,负值区与原信号相乘,从而达到云的特征增强作用,弱化噪声的影响。以上过程相当于构造以下函数 $X_1(z)$ 和 $X_2(z)$:

$$X_1(z) = \begin{cases} -P(z)z^2 \frac{d^2P(z)}{dz^2}, & \frac{d^2P(z)}{dz^2} \leq 0 \\ 0, & \frac{d^2P(z)}{dz^2} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$X_2(z) = \begin{cases} 0, & \frac{d^2P(z)}{dz^2} \leq 0 \\ \frac{dP(z)}{dz} \frac{d^2P(z)}{dz^2}, & \frac{d^2P(z)}{dz^2} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$X_1(z)$ 幅值与云峰相关,称为云峰函数, $X_2(z)$ 幅值与云边界相关,称为云边界函数。公式(1)中使用 $P(z)z^2$ 是因为距离衰减效应将使高云层的云回波增幅下降,只有进行距离订正后才能使不同高度处的信号幅度更具有可比性^[4,8]。但由于原始信号中本来就包含噪声,进行距离订正后高度越高处噪声被放大的倍数也越大^[9],特别是在白天受太阳光背景干扰时更明显,因此对于微分信号的计算还是采用对原始信号进行微分,而不是对距离订正后的信号进行微分,以避免高层被过度放大的噪声被带入到微分信号中去。云峰函数 $X_1(z)$ 中考虑到二阶微分信号是负的,故加上负号使其都变成正值。另外,二阶微分信号在云底和云顶附近虽然都达到了极值,但都是正极值,乘上一阶微分信号后除了边界特征得到增强外也把云底和云顶区分开。

1.3 数据处理流程与实例

(1) 计算微分信号

根据原始信号求得微分信号时一般是用某点附近 n 个点的回归直线斜率作为该点的斜率值,Pal 等提出在求微分信号时对数据进行 5~11 个点的拟合^[5],这里将对数据进行 11 个点的拟合,虽然拟合点数过多有可能使信号失真^[9],但测试发现拟合点数过少将导致微分后噪声影响变大,给阈值设定带来困难,因此具体的点数应根据所取数据的高度分辨率和数据质量以及通过实验综合确定。图 2 为某型号激光云高仪的信号示例。

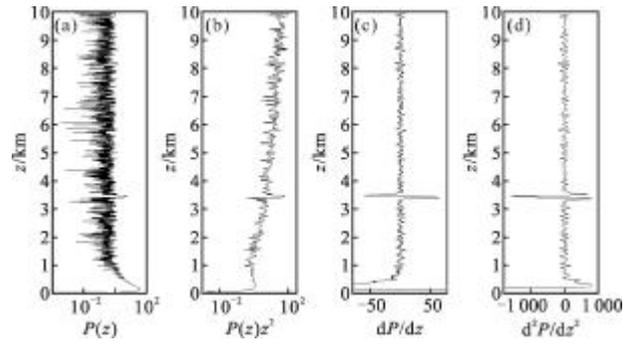


图 2 激光云高仪信号实例

Fig.2 Instance signal of a laser cellometer

(2) 计算云峰函数和云边界函数

使用公式(1)、(2)计算得到云峰函数 $X_1(z)$ 和云边界函数 $X_2(z)$ 。图 3 和图 4 为计算结果,图中 3~4 km 间存在一个云层。通过比较图 3(a)、(b)与公式变换后的图 3(c)可以看出,云层的特征在 $X_1(z)$ 中被放大了,噪声的影响明显被减弱了。类似地,图 4 中对 $X_1(z)$ 的计算结果也显示云的边界信息相比一阶微分信号被放大了不少。

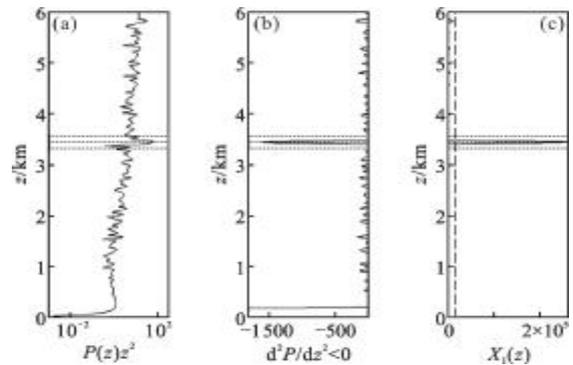


图 3 云峰函数的计算

Fig.3 Calculation of cloud peak function

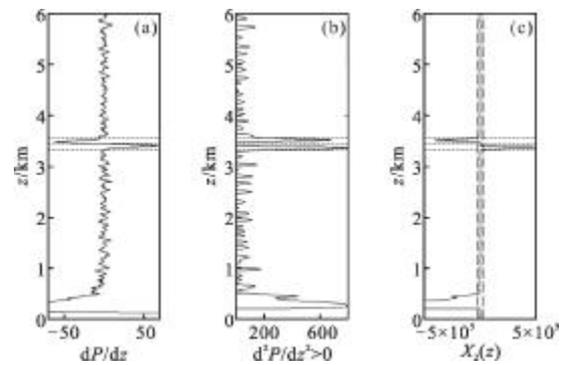


图 4 云边界函数的计算

Fig.4 Calculation of cloud boundary function

(3) 根据云峰函数和云边界函数检测云层及计

算云底高度和云顶高度

云峰函数和云边界函数对云回波特征的增强作用实际上给算法中的阈值设定^[5,8]带来了方便,可采用较高的阈值对云层进行识别。此算法将先根据云峰函数 $X_1(z)$ 初步选定云层,再根据云边界函数 $X_2(z)$ 对初选云层进行二次筛选后计算云顶和云底高度。 $X_1(z)$ 阈值初设为: $a_1 = \bar{X}_1(z) + n_1\sigma_1$ 。其中 $\bar{X}_1(z)$ 和 σ_1 分别为 $X_1(z)$ 的均值和标准差。为使 σ_1 能体现噪声水平,先寻找满足 $X_1(z) > a_1$ 的区间,排除以上区间后使用 $a_1 = \bar{X}_1(z) + m_1\sigma_1$ 计算 a_1 及确定区间,区间数为初选云层数,各区间最大值高度为云峰高度 z_m 。之后初设 $X_2(z)$ 阈值为 $a_2 = n_2\sigma_2$,其中 σ_2 为 $X_2(z)$ 的标准差。类似地,在初选云层的云峰高度 z_m 向下(上)寻找满足条件的区间。若在一定范围内找不到满足条件的区间则取消该初选云层,找到后将满足 $X_2(z) > a_2$ ($X_2(z) < -a_2$) 的区间下(上)界所在高度定为云底(云顶)高度。阈值 a_1 和 a_2 在图 3(c)、4(c)上用竖虚线标示,云底、云峰和云顶高度自下而上在图 3 和图 4 上用横虚线标示。

2 结果与讨论

图 5 为某型号激光云高仪的经过距离订正的回波信号,回波信号的时间跨度为北京时间 2012 年 4 月 18 日 02:00-18:00 共 16 个小时,期间共有信号廓线 721 组,信号的时间分辨率和空间分辨率分别为 1 min 和 5 m。由于白天太阳光背景噪声经距离订正被放大,可以看到 6:00 以后高空的噪声起伏相当明显。由图中可看出在早晨 7:00 前云层比较连续地分布在 4 km 高度附近,而 7:00-12:00 在 5 km、9:00-11:00 和 13:00-18:00 在 4 km 附近则有间歇分布的云层。

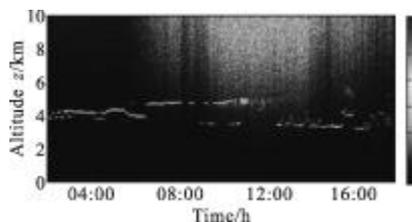


图 5 激光云高仪回波时空分布图

Fig.5 Spatial and temporal distribution of return signal of laser ceilometer

利用图 5 中的数据,分别使用微分交叉法和微分增强法进行云高信息提取。微分零交叉法中主要

应用点数阈值判据^[5],即满足 $dP/dz > 0$ 的连续点数达到阈值 K 时判定云层存在,对 K 分别取值 20 和 18 以便进行对比。在文中所提出的微分增强法中,与阈值相关的一些常数经测试后确定为 $n_1 = n_2 = 4$ 和 $m_1 = m_2 = 10$ 。两种算法的云检测结果分别如图 6-8 所示,某一时间点对应的云层用反演所得云顶高度和云底高度的连线表示。

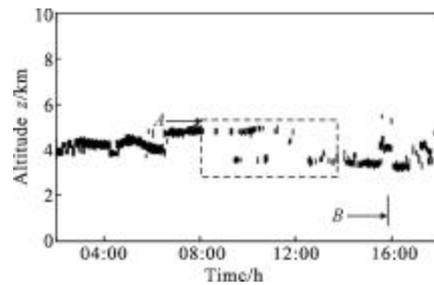


图 6 微分零交叉法云检测结果(K=20)

Fig.6 Detecting results of the differential zero-crossing method (K=20)

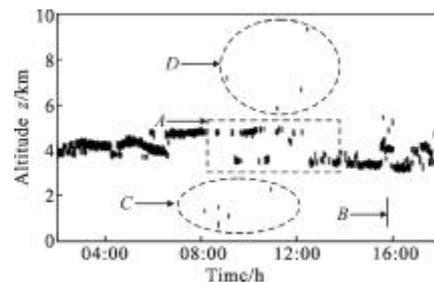


图 7 微分零交叉法云检测结果(K=18)

Fig.7 Detecting results of the differential zero-crossing method (K=18)

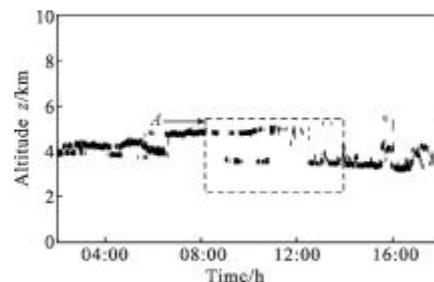


图 8 微分增强法云检测结果

Fig.8 Detecting results of the differential enhancing method

对比以上两种算法的检测结果可以看出,在 08:00 前两种算法的检测结果是基本一致的;而在 08:00-14:00 间,即在图中 A 区可看出 3~5 km 间,图 6 微分零交叉法的云层检出率明显较少,连续性较差,虽然图 7 因为降低了点数阈值 K 而使云层检出数有所增加,但总的来说仍不如图 8 微分增强法的检测结果好。图 7 由于降低了点数阈值还使得 C、D 区增

加了一些零星“云层”。对比图 5 的回波信号图可知, 由于 06:00 后由于太阳光和气溶胶垂直分布变化的影响使噪声水平逐渐升高, 从而导致云层的信噪比下降, 使得微分零交叉法在检测时 A 区云层时因满足 $dP/dz > 0$ 的连续点数未达到阈值 K 而产生漏判, 而在 C、D 区则将部分起伏较强烈的噪声误判为云层。再观察图 6、7 均在 B 区即 16 时 1 km 高度附近检出了少量有一定厚度“云层”, 但这不符合云层的时间连续性原则, 初步估计是该高度处的气溶胶层所造成的误判, 而在图 8 中则消除了 B 区的误判, 这是因为气溶胶层的一阶微分信号变化幅度即二阶微分信号较小, 从而使得计算得到的云峰函数 $X_1(z)$ 和云边界函数 $X_2(z)$ 也偏小, 在一定程度上可以证实了云峰函数 $X_1(z)$ 和云边界函数 $X_2(z)$ 对云层和气溶胶层的区分能力较好。

为验证微分增强算法与微分零交叉法在云高判断方面的一致性, 对两种方法的云底高度和云顶高度进行对比, 如图 9 所示。由图 9(a)、(b) 可以看出, 在所给时间段内两种方法共同检测出云层时, 反演出的云底高度和云顶高度相当接近, 相关系数均达到了 0.99 以上。微分增强法(DEM)和微分零交叉法(DCM)反演出的云底高度样本均值分别为 4.01 km 和 3.99 km, 云顶高度样本均值分别为 4.27 km 和 4.30 km。对比说明, 微分增强法与微分零交叉法反演的云高具有很好的一致性。

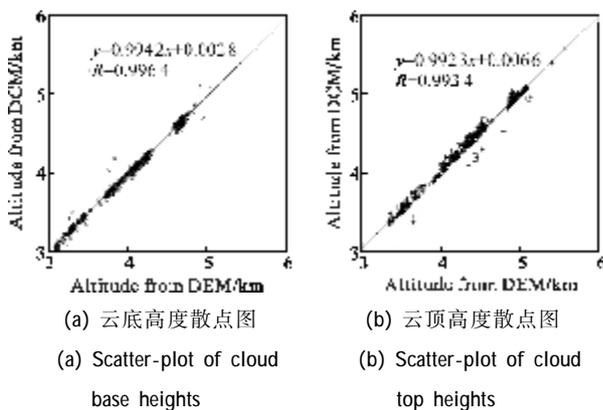


图 9 微分增强法和微分零交叉法反演的云底和云顶高度对比
Fig.9 Cloud base and top heights from the differential enhancing method and the differential zero-crossing method

3 结论

通过分析激光云高仪的云回波信号特点, 以及

原始信号、一阶微分信号和二阶微分信号对云层特征的反映形式, 构造了两个新的更能反映云层特征的信号序列, 提出了基于微分增强的云检测算法, 并利用该算法与微分零交叉法进行对比。结果表明, 与现有的云检测算法相比, 该算法在信噪比较低时也能有效检测出云回波, 且可以避免将气溶胶层或起伏强烈的噪声误判为云层的情况, 有效地减少了云检测过程中的漏判和错判。微分增强算法在保证云高判断的同时减少了云的错判和漏判, 因此可用于激光云高仪中云的检测。

参考文献:

- [1] He Junfeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. New method of lidar ceilometer back scattersignal processing based on Hilbert-Huang transform [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 41(2): 397-403. (in Chinese)
- [2] Winker D M, Vaughan M A. Vertical distribution of clouds over Hampton, Virginia observed by lidar under the ECLIPS and FIRE ETO programs [J]. Atmos Res, 1994, 34 (1-4): 117-133.
- [3] Pal S R, Steinbrecht W, Carswell A I. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent[J]. Appl Opt, 1992, 31: 1488-1494.
- [4] Han Daowen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Memorable glide window integral algorithm for retrieving cloud height [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211-220.
- [6] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations some comments[J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652-653.
- [7] Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Tao Zongming, et al. Lidar geometrical form factor and its effect on aerosol detection[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22 (2): 299-304. (in Chinese)
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] Wang Qingmei, Zhang Yimo, Liu Tiegeng, et al. Portable Lidar ceilometer for cloud-base height measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(9): 1312-1316. (in Chinese)