

激光云高仪云量自动反演算法

杨成武^{1,2} 刘文清¹ 张玉钧¹

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

²合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037

摘要 云是气象预测和航空航海等领域中非常重要的因素之一,所以对云进行观测具有重要的现实意义。而云量作为其中重要的气象参数之一,已成为气象观测的重要内容。目前,对于云量的观测主要还是靠目测,由于各种因素的影响导致误差较大。测量云量是激光云高仪的一个重要应用。提出了一种激光云高仪云量自动反演算法,算法以激光云高仪单点测量数据为基础构造一个关于时间和云层高度的二维图像,按照云层所占用的时间比率进行反演计算云量。对比实验验证表明,算法能较为准确地反演出云量信息,对激光云高仪具有实用价值。

关键词 大气光学;云量;算法;激光云高仪;反演

中图分类号 X831.03 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.030102

Automatic Inversion Algorithm of Cloud Cover of Laser Ceilometer

Yang Chengwu^{1,2} Liu Wenqing¹ Zhang Yujun¹

(¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²Electronic Engineering Institute of Hefei, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract Cloud is one of the important factors in the field of meteorology forecasting and navigation and so on. Therefore, it is important to measure cloud. As one of the important meteorological parameters, the cloud cover has become an important part of meteorological observations. So far, the measurement of cloud cover mainly relies on visual observation, which leads to large deviations because of various factors. Measuring the cloud cover is an important application of laser ceilometer. An automatic inversion algorithm of cloud cover of laser ceilometer is proposed in this paper. The purpose of the algorithm is to construct a two-dimensional image of time and cloud height based on the ceilometer measurements only from a single point. The cloud cover is calculated according to the ratio of time occupied by clouds. The comparative experiments show that the algorithm can more accurately calculate the cloud cover information, and it is of great practical value for laser ceilometer.

Key words atmospheric optics; cloud cover; algorithm; laser ceilometer; inversion

OCIS codes 010.3640; 010.1290; 010.1350

1 引言

云直接影响着地气系统的辐射平衡、热量平衡和温湿平衡,参与多种正负反馈过程,是航空、航天、大气辐射传输、酸雨形成的环境条件^[1],而云量是其中重要的气象参数之一,能较大程度地反映这种反馈机制,因此了解云量的分布规律和特征,具有十分重要的现实意义和理论价值。

目前,获取云量的方法主要包括通过气象卫星探测的辐射信号反演云量、地面气象台站目测云量等。通过卫星探测的辐射资料反演而来的云量资料具有较好的空间覆盖性,适于反映大范围的云气候特征;来源于地面测站的目测云量能够较好地反映局地云气候特征,但由于受目测视野和设站及观测条件的限制,使得地面测站的云量时空连续性较差。目前在气象观测中,云量主要是通过人工目测确定,然而要实现云量的实时在线测量,靠人的观测是不行的,而且人的观测结果并不十分准确,观测员本身的主观判断以及云的不规则

收稿日期: 2011-08-25; 收到修改稿日期: 2011-10-25; 网络出版日期: 2011-12-23

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项基金(GYHY200706023)资助课题。

作者简介: 杨成武(1979—),男,博士研究生,主要从事激光雷达大气环境监测方面的研究。E-mail: cwyang@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事新型环境监测技术,痕量气体、水体、目标散射特性等的光学与光谱学监测方法,机动车尾气在线监测技术等方面的研究。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

形状、零散分布和运动变化等因素都会给观测结果带来误差。但目前用来测云量的商用仪器还很少,且价格昂贵,现在很多气象站和机场还达不到要求。激光雷达作为一种新型的大气观测工具,可以通过直接探测激光与大气相互作用的光辐射信号来定量地反演大气参数信息^[2~4],具有表现细节信息能力强、测量参数多、自动化程度高等特点,是一种测云的有效工具。如何根据激光雷达回波信号找到自动反演云量的算法是利用激光雷达测量云量的难点。本文通过对半导体激光云高仪后向散射回波信号进行处理,寻找一种云量自动反演算法,从而从单点测量的后向散射回波信号数据中自动获取天空的云量信息,并将结果与芬兰 Vaisala 公司激光云高仪所测得的云量进行对比,以检验该算法的正确性和有效性。

2 激光雷达测量云量的基本原理

2.1 云量定义

云量是指云遮蔽天空视野的成数^[5]。云量的多少,一般通过云块占据天空的面积来估计。国外一般以八分量来估算云量大小,而我国则采用十分量估计云量,通常将整个天空划分为 10 等份,碧空无云或被云遮蔽不到 0.5 份时,云量记为“0”;云遮盖天空一半时,云量记为“5”;全天空都布满云时,云量记为“10”。云量的观测包括对总云量和低云量的观测,总云量指观测时天空被所有的云遮蔽的总成数,低云量是指天空被低云所遮蔽的成数。对云量的观测在天气预报中是很重要的,可以根据云量的多少来确定晴、少云、多云和阴等天气状况。

世界气象组织(WMO)对云量的报道有严格的标准。由一种特定类型的云(部分云量)或全部类型的云(总云量)覆盖天空的成数就可以估计云量,在两者任何一种情况下,以最接近的八分量估算,并按最接近的八分量的标度来报告,除了数字 0 和 8 在标度上分别表示完全晴空和阴天外,其余依次按云量多少调整到最接近的数字。本文提出了一种半导体激光云高仪云量自动反演算法。为了验证该云量反演算法的正确性,采用与 Vaisala 激光云高仪相同的八分量来计算云量。表 1 是 Vaisala 激光云高仪采用的八分量所对应的天气状况。

表 1 Vaisala 云高仪云量和天气之间的关系

Table 1 Relationship between cloud cover and weather in Vaisala ceilometer

Text	CLR(clear)	Few	SCT(scattered)	BKN(broken)	OVC(overcast)
Sky cover	0	1/8~2/8	3/8~4/8	5/8~7/8	8/8

2.2 激光雷达测量云量的原理

激光云高仪作为一种能够反映局地气候特征的云探测工具,对于需要报告局地云信息的气象站和机场等来说具有非常重要的价值。激光云高仪测量云量的关键是如何寻找可靠的云量反演算法并根据激光雷达回波信号准确地反演出云量信息。激光云高仪是一种从单点测量后向散射回波信号数据中自动获取云量信息的仪器,云量反演算法的目的是以激光云高仪单点测量后向散射回波信号数据为基础构造一个全天空图像。云量测量的基本原理是:将激光云高仪垂直放置,按照一定的距离分辨率 Δz 和时间分辨率 Δt 采集激光云高仪回波信号,然后对采集到的原始信号进行处理,通过对云连续地探测,按照云层所占用的时间比率进行反演计算云量,并假设这些时间的平均结果代表测量点周围的空间状况。

进行云量反演时,以激光云高仪前 30 min 所采集的数据为基础,并对其中的后 10 min 数据进行双加权以使得该算法更适合云层的实时变化,以后每 5 min 更新一次天空云量状况信息,通过使用时间连续的激光云高仪测量数据来计算不同云层的云量。该算法的操作演算如图 1 所示,整个演算过程并不仅仅是简单地云层高度形成一个高度直方图,而是通过使用高度和时间二维空

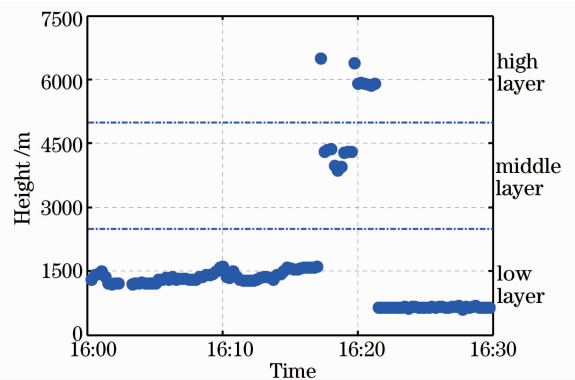


图 1 云量反演算法的基本操作

Fig. 1 Basic operation of the inversion algorithm of cloud cover

间变量来寻找那些彼此接近的云层。首先将整个探测空间划分成三个大的云层,分别为低层、中层和高层,然后以这三个云层为基础将那些时间和高度比较接近的云层按照一定的算法聚合成新的云层,同时为每一个新的云层计算一个高度值,该高度给出了这些云层所代表的云的云底高度,最后根据云层所占用的时间比率反演计算得到各个云层的云量。该算法能计算 7500 m 以下的三个不同的云层,以介于 0 和 8 之间的八分量为单位报告云量。此外,云量可以有 -1 和 -2 值,如果由于某种原因造成数据丢失或激光云高仪在待机模式时其值为 -1,如果在云高仪启动后显示没有足够的数据进行算法处理时其值为 -2。

3 云量自动反演迭代算法

根据上述原理反演云量时,云量反演算法可以通过使用四个独立的模块实现,算法控制流如图 2 所示。

1) 初始化模块

初始化模块,首先选择过去 30 min 的激光云高仪测量后向散射回波信号数据,按时间序列进行排序,并将其存放在指定的数据结构中。然后,检查这些数据的充分性,此时一般需要比较两个特征值,即过去 30 min 的测量数据组数和过去几分钟的测量数据组数,如果这两个特征值中的任何一个超过了给定的阈值,则将数据标记为有效,并会被后面的算法所使用。实际运行时,这两个特征值都需要一个固定的采样周期,在数据测量过程中会被自动检测到。如果没有有效的激光云高仪数据,返回值 -2 作为云量值,如果时间超过了 30 min 则返回 -1 作为云量值。

2) 云层识别模块

云层识别模块主要对半导体激光云高仪测量数据进行云层识别。根据激光云高仪后向散射回波信号准确识别出云层信息是利用激光云高仪自动反演云量的重要前提。目前已经有许多学者发展了不同的云层识别算法,

主要有微分零点法^[6]和记忆式的滑动窗口积分法^[7]等。微分零点法的主要思路是,首先对激光雷达回波信号进行微分,然后寻找微分信号的零点位置,不同的零点位置分别对应了云底、云峰和云顶的位置。然而实际上,在非均匀的云和气溶胶环境下,回波信号微分的过零点可能会有很多,雷达回波信号中的噪声也会产生很多额外的过零点。从众多的零点中提取出有效的零点是一项非常复杂的工作,且易造成误判。记忆式滑动窗口积分法首先对选定窗口内的回波信号进行积分,由于在一段区间内叠加到信号上的随机噪声产生的正作用与负作用基本相当而使得其积分接近于 0,通过适当选取阈值即可将云层信息提取出来。然而选择不同大小的窗口会对分选结果产生很大影响,如果窗口太大则给云底和云顶位置的确定带来一定的困难,如果窗口太小则阈值的选取很困难,有些叠加了噪声的信号可能不能有效地加以排除,而且对于高度较低、厚度较薄的云使用该算法不能有效反演出云层高度。因此,为了能准确识别出各种类型的云层信息,本文根据激光雷达回波信号特点提出了一种新的云层高度反演算法——峰值面积积分算法。一方面,由于云层处回波信号的值要比其他处回波信号的平均值大,该方法将峰值的大小作为判断是否为云层信号的判据之一。另一方面,云层回波信号比气溶胶回波信号大,与随机噪声产生的峰值信号相比其脉冲宽度又大很多,而且由于有效的云层信号值一般为正值,因此将值为正的回波信号曲线组成一个个小窗口,然后从地面开始,把每一个窗口内的回波信号累积起来,通过积分值大小可以明显看出云层信号与气溶胶信号、噪声的区别。判断是否为云层信号的另一个判据则是面积积分值大小。该方法实际上是通过云回波信号进行面积积分,叠加放大信号中的云层信息,以峰值和面积积分值作为判断准则,通过选取合适的阈值,将云层与噪声、气溶胶区分开来,进而反演出云层高度。在实际使用过程中,可采取以上三种算法分别对云层参数进行反演,再

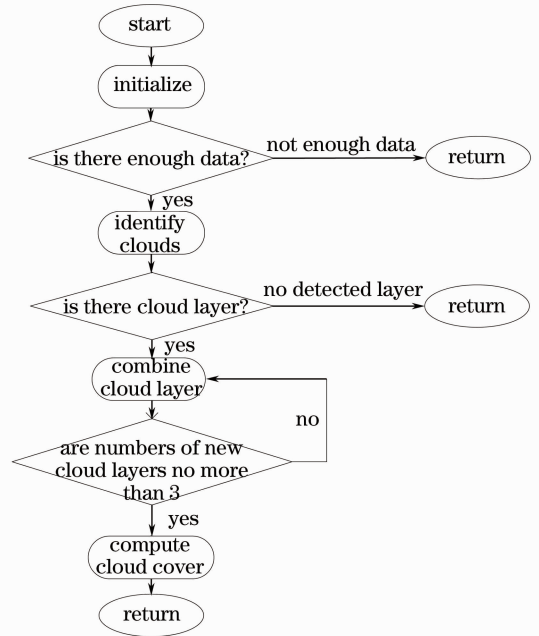


图 2 云量反演算法控制流

Fig. 2 Control flow of the inversion algorithm of cloud cover

根据反演结果采用证据理论进行二次融合,更加准确地识别出云层信息,包括云底高度、云层厚度等信息。如果云高仪测量数据包含多个云层,则分别计算出它们的云层信息,这样就形成了一个以时间和云层高度为坐标的二维时空渲染图。在对云高仪测量数据进行云层识别后,天空云量的信息逐渐明确。只有在给定时间内探测到的天空没有出现晴朗状况且测量数据没有任何表明晴天条件的时候,总云量值为8。

3) 云层聚合模块

云层聚合模块主要通过分层次聚类法将各个原始云层模块连接成新的云层。首先将整个探测空间划分为三个大的云层,即低层、中层和高层,以三个大的云层为基础将那些时间间隔较小、高度差异较小但是在同一个大的云层内部的原始云层组合成新的云层,如果原始云层位于三个大云层的分界线处,则将此原始云层聚合到高度离它最近的那个云层。此时需要保证经过原始云层合并后,合并后的云层数量不超过该模块要求的云层数量,否则就需要按照以上规则继续对云层进行合并,以将云层数量减少到该模块要求的范围之内。在每个新的云层形成之后,所有已被组合的原始云层将被删除,如果还有未结合的原始云层,则以上过程将被重复。最后,在所有的原始云层合并成新云层后,每个新云层都会被指定一个高度,该高度是周围所选择云层高度的平均值。

4) 云量计算模块

云量计算模块主要用于计算合并后云层的云量信息。首先对选择的 30 min 激光云高仪回波数据中的后 10 min 数据进行双加权,以使得该算法更适合云层的实时变化。然后根据加权后的云层所占用的时间比率计算各个云层的云量,并将计算结果转换成整数八分量,以八分量的标度来表示最终的云量值。

以后每隔 5 min 重复以上步骤一次,计算天空云量信息,通过使用时间连续的激光云高仪测量数据就可以实时计算出不同云层的云量。

4 实验结果

芬兰 Vaisala 公司生产的商用 CL31 型激光云高仪可以用来测量 7500 m 范围内的云量,并在保存的数据文件中提供云量信息^[8]。Vaisala 公司曾将该云高仪的云量测量结果与人的观测结果进行过对比,结果表明,采用 Vaisala 激光云高仪测得的云量结果与目测法的结果 90% 吻合,证明了 Vaisala 激光云高仪反演云量方法的可行性。

为验证本文提出的云量反演算法的可行性,用该算法处理了 Vaisala 激光云高仪从 2011 年 1 月 12 日至 2011 年 3 月 14 日在北京南郊观象台所采集的数据。对于同一时间段采集的数据,分别把本文提出的算法处理结果与 Vaisala 云高仪的测量结果进行了对比,这里取 2011 年 2 月 13 日采集到的一组数据进行处理,结果分别如图 3、图 4 所示。图 3 表示由 Vaisala 激光云高仪测得的云量值,图 4 表示运用本文算法处理同一组 Vaisala 激光云高仪回波数据得到的云量值。从图中可以看到:运用本文算法反演得到的云量值与 Vaisala 云高仪本身得到的云量值非常接近,而且采用本文算法得到的云量值大小随时间的变化更加平滑,未产生较大的突变现象,

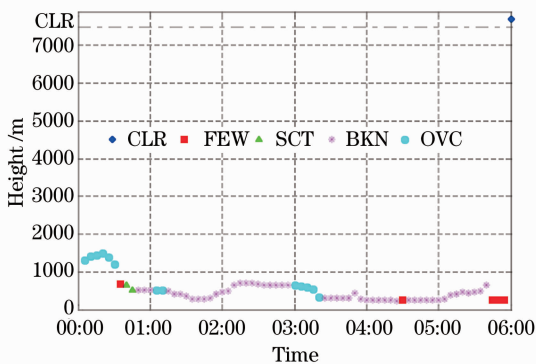


图 3 Vaisala 激光云高仪计算得到的云量
Fig. 3 Cloud cover obtained with Vaisala laser ceilometer

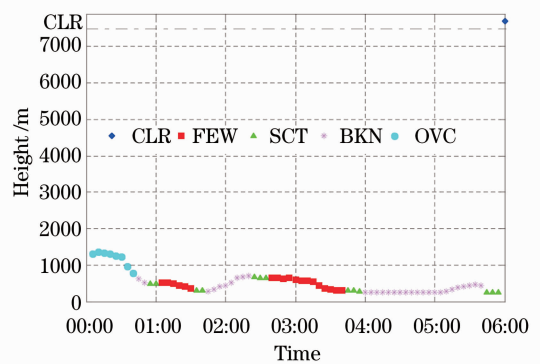


图 4 利用本文算法处理同一组数据反演得到的云量
Fig. 4 Cloud cover retrieved by the proposed inversion algorithm from the same lidar return signal

更加符合天空云量的实际变化。因此,利用本文算法能够较为准确地计算出云量信息。

5 结 论

云量是重要的气象参数之一,开展对云量反演算法的研究具有非常重要的意义。本文提出了一种激光云高仪云量自动反演算法。实验对比表明该方法能有效实现激光云高仪对云量的探测。目前该算法已应用于某型号半导体激光云高自动测量系统软件中,用来实时计算天空的云量信息。

参 考 文 献

- 1 Xu Huanbin. The study of cloud model: the simulation of macrostructure of cloud field[J]. *Acta Meteorological Sinica*, 1995, **53**(3): 349~357
许焕斌. 云系模式研究: 云场的宏观结构模拟[J]. 气象学报, 1995, **53**(3): 349~357
- 2 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001
姜海娇, 来建成, 王春勇 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0514001
- 3 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
- 4 Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo *et al.*. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701005
吴良海, 高 隽, 范之国 等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0701005
- 5 Shi Yang, Yao Yongqiang, Liu Liyong. A method for observing and counting day-time cloud amounts in an astronomical site survey[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, **5**(4): 415~419
施 洋, 姚永强, 刘立勇. 天文选址数字云量白天观测处理方法[J]. 天文研究与技术, 2008, **5**(4): 415~419
- 6 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
- 7 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
韩道文, 刘文清, 张玉钧 等. 用于反演云层高度的记忆式滑动窗口积分算法[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(1): 1~5
- 8 Vaisala Oyj Corporation. Vaisala Ceilometer CL31 User's Guide[M]. Helsinki: Vaisala Oyj, 2006. 28~32