

文章编号:1001-5078(2007)12-1250-03

基于激光雷达的水平能见度自动反演算法

韩道文^{1,2}, 刘文清¹, 张玉钧¹, 刘建国¹, 陆亦怀¹, 仲健³

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

2. 中国人民解放军电子工程学院, 安徽 合肥 230037; 3. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘要:激光雷达测量能见度是激光雷达的一个重要应用, 水平能见度的反演在线性区的选取上存在的不确定因素制约了激光雷达的应用。本文根据激光雷达水平测量数据的特点, 提出了一种迭代扩展算法确定水平测量数据的线性区, 并进而反演水平能见度。该算法可以确定线性区的最大范围, 并将非线性区排除出去。经实验验证表明, 该算法能可靠地自动反演水平能见度。

关键词:激光雷达; 水平能见度; 迭代扩展算法

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

An Algorithm for Horizontal Visibility Based on Lidar

HAN Dao-wen^{1,2}, LIU Wen-qing¹, ZHANG Yu-jun¹, LIU Jian-guo¹, LU Yi-huai¹, ZHONG Jian³

(1. Key Lab. of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031;

2. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037; 3. Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The algorithm of retrieving the horizontal visibility based on lidar was developed in this paper. The horizontal measurement data of lidar exists a linear area which is difficult to ascertain. The algorithm firstly iterates in special data segment to fix on the linear area, then expands the area to both ends, and finally gets the longest linear area. The horizontal extinction and visibility can be retrieved through the final linear area. The results compared with Vaisala apparatus indicate that the iterative expanding algorithm could be used to retrieve the horizontal visibility.

Key words: lidar; horizontal visibility; iterative expanding algorithm

1 引言

能见度的好坏直接影响人们的工作、生活以及陆、海、空交通活动的正常进行。低能见度的出现更会给人们带来诸多不便和各种危害, 常常是造成交通和飞机起降重大事故的重要原因^[1]。在舰船安全航行、军用光电装备的使用过程中, 大气能见度也是一个重要的参数, 其实时、精确的获取对于目标快速、准确地识别、捕获和打击起着重要的作用^[2]。

大气能见度目前还没有一个严格的定义, 世界气象组织(WMO)于1971年对白天能见度的定义为: “气象上的白天能见度是指, 在天空或雾气背景条件下, 近地面适当大小的黑色物体可以被看见或分辨的最远距离^[3]。”

传统上, 人眼观测是最早和最为简便地观测大气水平能见度的方法, 但由于受观测者主观因素的影响而产生较大的观测误差。利用观测仪器对能见度进行测量的方法主要分为照相法、气溶胶采样法

和光学参数测量法^[4], 现有能见度自动测量系统多采用透射式、前向散射式和 CCD 摄像法等方式, 这些设备都需要合作目标, 体积较大, 成本较高, 安装和携带不方便。虽然获取受气溶胶影响目标物的清晰度照片是测量能见度变化最简单和直接的方法^[5], 但由于很难从照片或图片中提取定量信息, 所以增加了其实际应用的难度。气溶胶采样法是通过直接测量大气中气溶胶粒子的浓度来间接反演能见度数值, 由于该方法中涉及不同种类和尺度气溶胶粒子的光学特性, 光辐射与粒子间的作用类型以及采样过程中的繁琐步骤, 使得其测量精度难以保证。因此对大气最基本的光学特征参数测量是最可靠的能见度测量方法。

作者简介: 韩道文(1974-), 男, 安徽光机所博士研究生, 主要研究方向为激光雷达环境监测。E-mail: dwhan@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2007-06-12; **修订日期:** 2007-08-03

2 激光雷达测量能见度的传统方法

通常,大气在水平方向上是比较均匀的,因此水平方向上的米(Mie)散射激光雷达方程可写为^[6]:

$$P(R) = CR^{-2}\beta\exp(-2\alpha_H R) \quad (1)$$

式中, $P(R)$ 是激光雷达接收的大气后向散射光的回波功率(W); C 是激光雷达系统常数($W \cdot km^3 \cdot sr$); β 是大气水平后向散射系数($km^{-1} \cdot sr^{-1}$); α_H 是大气水平消光系数(km^{-1})。对式(1)两边取对数并对距离 R 求导得出:

$$\frac{d(\ln(P(R)R^2))}{dR} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dR} - 2\alpha_H \quad (2)$$

由于已假定大气水平均匀,故 $d\beta/(\beta dR) = 0$ 。因此,对 $\ln(P(R)R^2)$ 和 R 进行最小二乘法线性拟合,拟合直线斜率的一半则是大气水平消光系数 α_H 。这就是确定大气水平消光系数 α_H 的斜率法^[7]。

大气水平能见度 R_v 与人眼最为敏感的550nm波长大气水平消光系数 α_H 和人眼的对比度阈值 ε 之间的关系为^[8]:

$$R_v = \frac{1}{\alpha_H} \ln \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{\alpha_H} \ln \frac{1}{0.02} = \frac{3.912}{\alpha_H} \quad (3)$$

由式(3)得到大气水平能见度 R_v 。

根据上述原理反演水平能见度时,通常的做法是:将激光雷达水平放置测量,采集获得气溶胶的后向散射信号,然后对信号进行处理,处理的一般步骤是:

(1)将得到的激光雷达原始数据除去噪声。设除去噪声的雷达信号为 $P(R)$ 。

(2)将雷达信号进行距离修正,把雷达信号乘以距离的平方,即 $P(R) \times R \times R$,称之为 PRR 信号。

(3)取 PRR 信号的对数。即计算 $\ln(P(R)R^2)$,并画图。图1是典型的 $\ln(P(R)R^2)$ 图。

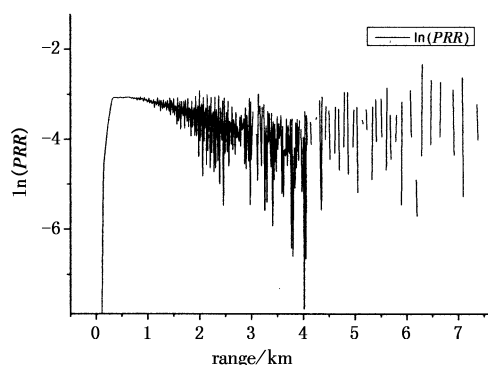


图1 典型雷达信号的 $\ln(P(R)R^2)$ 图

(4)拟合 $d(\ln(P(R)R^2))/dR$ 。通过观察,从图中选取线性特性较好地一段,如图中(0.5~3)km,运用最小二乘拟合,得到水平消光系数。如图2所示。得到 $\alpha_H = 0.205$,即大气水平消光系数为0.205。

(5)计算水平能见度。由公式(3),得到水平能见度为:

$$R_v = \frac{3.912}{\alpha_H} = \frac{3.912}{0.205} = 19 \text{ (km)}$$

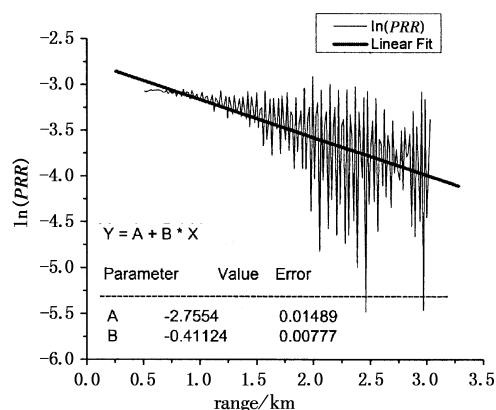


图2 $\ln(PRR)$ 的线性拟合图

从上面的计算步骤可以看出,要计算水平能见度,首先要计算大气水平消光系数,而水平消光系数的计算依赖于 $\ln(P(R)R^2)$ 信号线性区的选取。在不同能见度条件下,因为大气中气溶胶粒子的浓度不同,激光雷达探测的距离也不同,因此线性区范围也是不确定的。用上述方法反演水平能见度时,通常都是手工操作,通过人工判断来选择线性区,再进行最小二乘拟合,得到消光系数,进而得到水平能见度。本文提出一种通过迭代扩展的方法来选取线性区,计算消光系数,实现水平能见度的自动反演。

3 迭代扩展算法

为了得到图1所示信号的线性区,首先确定线性区可能的起点。近距离内因为散射信号没有完全进入接收视场(称为重叠区),因而被排除在起点之外。因此,线性区可能的起点就是从重叠区结束的位置开始的。激光雷达的重叠区很容易被确定。

从重叠区结束的位置开始,取固定长度 L 的数据进行最小二乘拟合,记下拟合的结果,包括斜率 a 、截距 b 、平均标准偏差 s 等。然后将开始位置后移一位,再取长度 L 的数据进行最小二乘拟合,记下拟合的结果,……,一直拟合到在洁净大气环境下激光雷达能探测的最远距离处,如6km处。这是一次对线性区的循环迭代运算。计算的数据段有的位于线性区内,有的一部分位于线性区。完全位于线性区内的数据段,其拟合的平均标准偏差肯定小于不完全位于线性区内的数据段,据此我们可以找到完全位于线性区内的数据段。

比较所有数据段的平均标准偏差,取其中平均标准偏差最小,并且小于指定阈值的数据段。该数据段可能仅仅是线性区的一部分,因此需要对该线性区进行扩展。扩展时从该数据段的两端依次进行。先取该数据段某端的临近数据,加入该数据段,对扩展的 $(L+1)$ 个数据段进行最小二乘拟合,若拟合得到的斜率 a 、截距 b 、平均标准偏差 s 与扩展前的对应参数相比,差值在指定的阈值范围之内,则认为该点可扩展,否则,该点不可扩展,则不再向这端扩展。然后再取数据段另一端的临近数据加入数

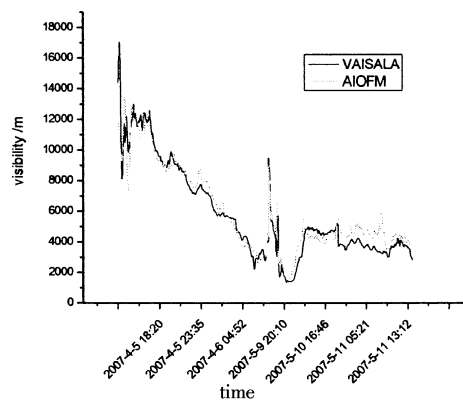
据段内,进行最小二乘拟合,再比较拟合结果,确定是否可扩展。依次循环,直到数据段两端都不可扩展为止。以最后得到的数据段为线性区范围。

初始迭代时数据段的长度 L 应取得足够大,否则受噪声的影响会比较大,但是也不能取得太大,太大会超出线性区范围,一般取 $(1 \sim 1.5)$ km。扩展时,判断某点是否可扩展的标准要相对严格,通常的做法是取对应参数的 5% 作为阈值。在选取扩展数据段时,不仅其平均标准偏差最小,而且要小于指定阈值。如果其值大于该阈值,表明该段数据的线性不太好,因而该信号没有大于 L 的线性区,此时无法用该方法计算水平能见度。

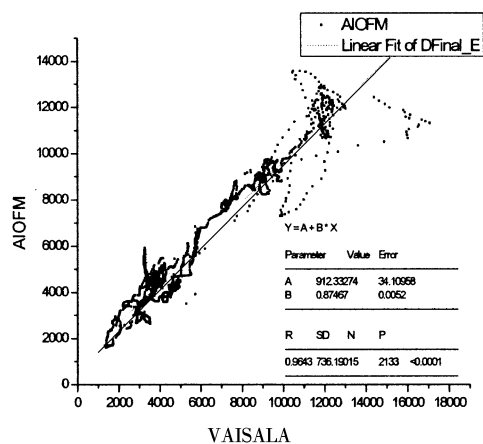
4 实验结果

为验证算法的正确性,用该算法处理了安徽光机所自行研制的激光雷达水平测量的数据,并把结果与 Vaisala 能见度仪的测量结果进行了对比。

实验在不同的时间段进行,经历了各种不同的能见度天气,两种仪器放置在一起。图 3(a) 是两种仪器得到的能见度对比图。图 3(b) 是两种仪器测量结果的拟合图。图 3 中 VAISALA 表示用 Vaisala 能见度仪测量的数据, AIOFM 表示利用安徽光机所研制的激光雷达水平测量的数据通过迭代扩展算法计算得到的能见度数据。



(a) 两种仪器测量的能见度值



(b) 两种仪器测量的能见度拟合结果

图3 两种不同仪器测量的能见度值及其拟合结果

从图 3 可以看出,两种仪器测量结果的相关性为 96%,表明用迭代扩展算法来处理激光雷达水平测量数据是可行的,同时表明用激光雷达来测量水平能见度也是可行的。

5 结论

能见度是对航空、航海、陆上交通以及军事活动等都有着重要影响的气象要素,激光雷达对水平能见度的监测一直是人们研究的重点内容之一。本文提出了迭代扩展算法寻找激光雷达回波信号中的线性区,进而得到水平平均一的消光系数,由此计算水平能见度。实验对比表明该方法可有效实现激光雷达对水平能见度的监测。目前该算法已应用于某基地的大气辐射传输系统的激光雷达软件中,用来计算获取大气透过率所必须的水平能见度数值。

参考文献:

- [1] Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing[J]. Meteorological science and technology, 2003, 31(2): 109 - 114. (in Chinese)
- [2] Jiang Bing-li, Wang Jiang-an, Zong Si-guang Principle and experimental research of carrier lidar for detecting visibility[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(8): 548 - 550. (in Chinese)
- [3] Xie Chen-bo, Han Yong, Li Chao, et al. Mobilelidar for visibility measurement[J]. High Power Laser and Particlebeams, 2005, 17(7): 971 - 975. (in Chinese)
- [4] Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 1347 - 1370.
- [5] Malm W C, Gebhart K A, Sisler J F. Introduction to visibility[M]. Fort Collins: Colorado State University Press, 1999.
- [6] Legal T, Legal L, Lehn W. Measuring visibility using digital remote video cameras[C]//American Meteorological Society 9th Sympon Met Observ & Instr, 1994: 87 - 89.
- [7] Gerard J Kunz, Gerrit de Leeuw. Inversion of lidar signals with the slope method[J]. App. Opt. 1993, 32: 3249 - 3256.
- [8] M Bertolotti, L Muzii, D Sette. On the possibility of measuring optical visibility by using a ruby laser[J]. Applied Optics, 1969, 8(1): 117 - 120.