

doi:10.3788/gzxb20184704.0401002

# 移动式多基线能见度测试系统及其测量方法

李猛<sup>1,2</sup>, 徐玖治<sup>3</sup>, 熊兴隆<sup>3</sup>, 马愈昭<sup>3</sup>, 赵焱飞<sup>1</sup>, 张贵忠<sup>2</sup>, 姚键铨<sup>2</sup>

(1 中国民航大学 天津市空管运行规划与安全技术重点实验室 天津 300300)

(2 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室 天津 300072)

(3 中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室 天津 300300)

**摘 要:**针对单基线能见度测量设备采样体积单一、受噪声影响大的缺点,设计搭建了一套移动式可变基线能见度测试系统.该系统由发射、接收、移动以及信号处理四个模块组成,以 532 nm 激光作为发射光源,通过置于滑动轨道上的小车移动定点接收发射信号实现多基线测量,然后采用时间平均结合最小二乘法对初始信号进行处理获得最终大气能见度.系统采用单端移动接收采样法,可从理论上消除光学污染误差.理论分析了该设备的测量方差及基线采样点模型,并对系统进行加噪声模拟实验,证明了其抗噪声能力;最后在真实大气环境下对设备进行检验,通过与实际数据对比证明其可靠性.

**关键词:**能见度;探测;最小二乘法;可变基线;抗噪声

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0401002-8

## Mobile Multiple Baselines Visibility Meter and Its Measurement Approach

LI Meng<sup>1,2</sup>, XU Jiu-zhi<sup>3</sup>, XIONG Xing-long<sup>3</sup>, MA Yu-zhao<sup>3</sup>, ZHAO Yi-fei<sup>3</sup>,  
ZHANG Gui-zhong<sup>2</sup>, YAO Jian-quan<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Operation Programming & Safety Technology of Air Traffic Management,  
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(2 Key Lab of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(3 Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the single-baseline transmissometer is a single sampling volume device and effected by noise seriously, a mobile variable baselines visibility detection device is designed and produced. Four modules of emission, receiver, transfer and processor constitute the entire system. The emission sources is 532 nm laser. The trolley is set on the sliding track, receiving the signals in a state of continuous movement. Applying this approach, the multiple baseline visibility detection is realized. Then, the time averaging combing with least squares method is employed to compute the ultimate atmosphere visibility. This equipment only makes the use of single receiver to operate, which can eliminate the error caused by the optical system contamination in theory. By the error theoretical analysis, the detection variance and baseline sampling points models on the proposed system are exhibited, and the anti-noise performance is proved through adding noise simulations on the system. Finally, the entire device is tested in the real atmosphere, it is turned to be reliable by comparing the actual data.

**Key words:** Visibility; Detection; Least squares method; Variable baselines; Anti-noise

**OCIS Codes:** 010. 7295; 010. 1290; 010. 3310

## 0 引言

能见度作为一个重要的气象参数,在交通运输、航空、航海等领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>.它不仅反映了大

基金项目:国家自然科学基金(Nos. U1433202, U1533113, U1633109, U1533117)和中央高校基础研究基金(No. 3122016D031)资助

第一作者:李猛(1987-),男,讲师,博士,主要研究方向为光信息科学与技术. Email: 867750570@163.com

收稿日期:2017-09-26;录用日期:2018-01-09

<http://www.photon.ac.cn>

气对光的衰减程度,也体现了人眼对于气象环境的主观作用.合理而准确地观测大气能见度对于航空运输保障、飞机安全起降以及机场按时有效运行有重要的意义<sup>[4]</sup>.目前,已有的能见度探测方法主要分为两种,一种是基于散射原理设计的能见度探测方法<sup>[5-6]</sup>.例如,王敏<sup>[7]</sup>等对前向散射式能见度仪的室内检测方法进行研究,分析对比了能见度仪示值在不同条件下的一致程度;ALEXANDROS P<sup>[8]</sup>等采用激光雷达信号与噪声做差值对大气能见度进行探测;PENG P<sup>[9]</sup>等提出了一种双角度前向散射仪,并验证了其在雨天的优越性.这类方法对采样体积的选择更为灵活,可以通过散射角的改变对采样体积任意选择,但由于作用原理并非依据人眼的透射式特点,所以在低能见度测量或者采样成分较复杂时,误差相对较大.因而在实际应用中,散射式测量方法多为辅助测量,或在公路能见度等对低能见度精度要求不高的场合应用.另一种是基于透射式原理设计的能见度探测方法<sup>[10-12]</sup>.TANG F<sup>[13]</sup>提出了一种摄像黑靶能见度测试系统,该系统采用单一黑体与空间背景相对比的数学模型;DU K<sup>[14]</sup>等提出了一种数字光学方法测量能见度,该方法采用两个不同距离的光学采样图片,并根据图片与天空的对比计算大气能见度;2014年,杜传耀<sup>[15]</sup>提出了一种双光路透射式能见度仪,并验证其相较前向散射仪的优越性;2011年,田林<sup>[16]</sup>提出一种基于角反射器的单端透射式能见度仪,通过反射的方式增加了基线长度,从而扩大了采样体积.这类方法依据了人眼透射式原理以及气象光学视程的物理定义(2700 K 的白炽灯,光强衰减到 5% 所通过的光学路径长度<sup>[17-18]</sup>),因此理论上,低能见度下的测量较为准确,但由于采样体积单一、光学系统在气溶胶环境下污染的影响<sup>[19-21]</sup>,测量误差依然较大.根据民航机场的一些观测对比,应用维萨拉大气透射仪(LT31)测量 800 m 以下的误差最高会到达 50%.

针对这些问题,本文提出了一种移动式可变基线的多采样体积能见度测试方法,并根据此方法设计搭建了一套能见度标定测试系统,在测量运行时,可不断改变基线长度,测定不同采样体积下的能见度值,并采用数值平均结合最小二乘法获得最终能见度值.该方法采用单端移动接收的方法计算透过率,仅对接收端采样,不对发射端采样,从而可在理论上消除透镜污染的误差影响,同时结合多次测量引入最小二乘法,进一步增强了系统测量的稳定性和抗噪声能力.

## 1 移动式可变基线能见度标定测量系统

### 1.1 系统结构

移动式能见度标定测量系统实物如图 1,结构示意图如图 2,由激光发射单元、光学接收单元、滑动轨道单元、电动小车单元、控制及数据处理单元构成.



图 1 移动式可变基线能见度测试系统实物图

Fig.1 Practicality pictures of variable baseline visibility detection system

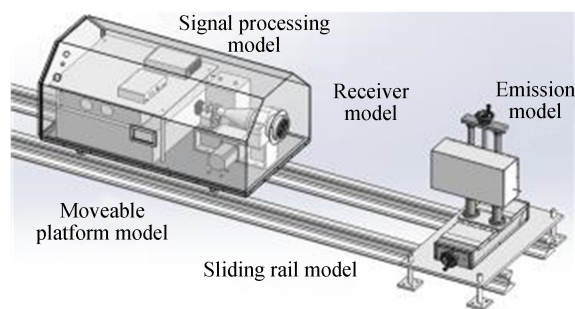


图 2 移动式可变基线能见度测试系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of variable baseline visibility detection system

激光发射单元包括激光器、发射光路系统、调整架.激光经过发射光路系统进行扩束,沿轨道方向发射.通过手动调整发射单元调整架,可改变激光束的位置和方向.激光发射器发射 532 nm 绿光,发散角  $<1.5$  mrad,光斑直径 2 mm.

光学接收单元由光学斩波器、光电探测器、锁相放大器以及接收光学系统组成.斩波器的透光孔径大小决定了接收后准直光的大小.将斩波器位于连续光之前,输出的参考信号接入锁相放大器,透过光束被探测器接收,探测器信号接入锁相放大器的信号通道,进行光能量的采集.

高精度 55 m 滑动轨道单元由两根长 55 m 的钢构导轨组成,导轨间隔 0.35 m,轨道高 0.2 m.导轨旁每 5 m 安装一个电磁感应片用于探测距离的校准.平台小车可在导轨上平滑移动,距离误差小于 0.005 m.

电动小车单元由安装底板、小车外罩、滚轮、齿轮、伺服电机、减速器、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、接近传感器、逆变器等部件组成.电机功率 750 W,安装底板上放置光电接收单元和信号采集单元.平台小车放置于导轨上,PLC 控制伺服电机运转,通过齿轮带动滚轮转动,从而控制小车的运动速度、往返次数和停留时间.根据接近传感器的信号,检测小车位置.小车运动过程中 X/Y 方向偏差极低,保证在整个测试过程中接收探头始终处于有效接收光路中.

采用传感器和感应片的方式实现小车位置精确定位,如图 3.

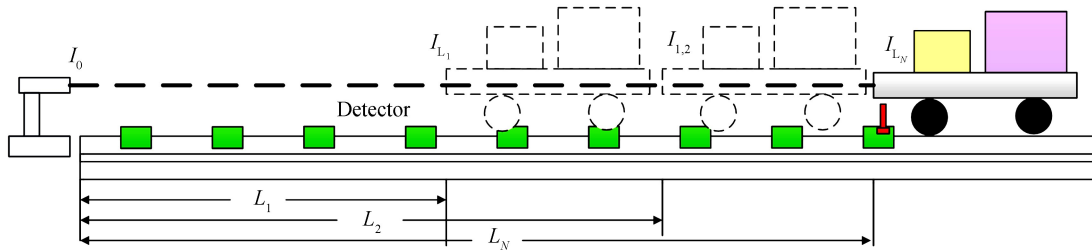


图 3 能见度探测系统工作原理图

Fig.3 Working principle diagram of the visibility detection system

控制及数据处理单元包括嵌入式工控机,通过软件对接收到的信号进行分析处理,并控制光电接收元件以及 PLC 工作状态.为了确保信号的稳定性,整个系统采用有线传输,在轨道旁安装带导轨的控制线路.

## 1.2 系统工作方案

激光器发射出 532 nm 的激光,光斑大小为 2 mm,全发散角为 1.2 mrad,斩波器放置于激光发射端,将连续光调制为脉冲光,斩波器的参考信号输入到锁相放大器的参考通道.激光发射光束经过 20 倍扩束光斑为 40 mm,发散角压缩至 0.06 mrad,传播 50 m 之后的光斑变为 43 mm,采用一个 100 mm 口径的镜头接收,足以消除小车在滑轨上因移动误差带来的光路偏转影响.

扩束后的激光束穿越待工作大气,由接收透镜组接收,接收激光汇聚在探测器的表面.探测器输出的模拟信号接入到锁相放大器的信号输入端.嵌入式小型计算机连接锁相放大器,采集锁相放大器中的数字信号,通过无线网络操作室内计算机相连接.操作室内计算机编有上位机程序,能够逐一读取每个点位的激光强度,通过各点相比,多点平均可以得到此刻的大气透过率值,进而获得大气能见度.

## 1.3 单端移动接收方法计算模型

普通的单基线能见度测量系统同时对发射端和接收端采样,然后将两值相比作为透过率,由于同时引入了发射端误差和接收端误差,两种误差不能相互抵消,所以系统稳定性和鲁棒性相对较差.而本系统用单端移动接收的方法计算大气透过率,仅对接收端采样,不对发射端采样,通过移动接收端的方法来获取不同基线下的透过率.该方法引入的误差只有接收端误差,如果短时间内接收端误差保持恒定,则通过相比计算可消除误差.

设在基线长度为  $L_1, L_2, \dots, L_N$  处的接受光强时间平均值分别为  $I_{L_1}, I_{L_2}, \dots, I_{L_N}$ , 如图 3.在相对基线长为  $L'_i = L_i - L_1$  处的透过率可表示为

$$T'_i = \frac{I_{L_i}}{I_{L_1}} \quad (1)$$

假设接收端的相对误差为定值,且误差比率为  $\eta$ ,则接收端的实际光强可表示为

$$\begin{cases} I'_{L_i} = \eta I_{L_i} \\ I'_{L_1} = \eta I_{L_1} \end{cases} \quad (2)$$

则可得实际透过率为

$$T_i = \frac{I'_{L_i}}{I'_{L_1}} = \frac{\eta I_{L_i}}{\eta I_{L_1}} = \frac{I_{L_i}}{I_{L_1}} \quad (3)$$

可见此时的接收端误差可以通过计算比值相互抵消.如果采用单基线测量,假设发射端误差比率为  $\eta_1$ ,则可得实际透过率为  $T_i = \frac{I'_{L_i}}{I'_{L_1}} = \frac{\eta I_{L_i}}{\eta_1 I_{L_1}}$ ,其相对误差不能消除.

根据柯西米德公式<sup>[22]</sup>可得

$$\begin{cases} I'_{L_i} = I'_0 \exp(-\sigma L_i) \\ T_i' = \exp(-\sigma L_i) \\ \sigma = -\frac{\ln T_i}{L_i} \\ L_i \sigma = -\ln T_i \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\sigma$  为大气消光系数,表示大气的吸收散射特性<sup>[23]</sup>.

实验采用多次测量取平均值的方法结合最小二乘法对信号进行提取计算测量.通过不同基线点透过率的检测,做出对数曲线,并根据其斜率求出最后的能见度值.

根据最小二乘法可计算最终的消光系数  $\sigma$ ,即

$$f(\sigma) = \sum_{i=1}^N (L_i \sigma + \ln T_i)^2 \quad (5)$$

$$\frac{df(\sigma)}{d\sigma} = 0 \quad (6)$$

于是可得

$$\hat{\sigma} = -\frac{\sum_{i=1}^N L_i \ln T_i}{\sum_{i=1}^N (L_i)^2} \quad (7)$$

根据能见度定义可得能见度  $V$  的计算公式为

$$V = \frac{3}{\hat{\sigma}} = -\frac{3 \sum_{i=1}^N (L_i)^2}{\sum_{i=1}^N L_i \ln T_i} \quad (8)$$

#### 1.4 理论误差对比

本文采用多基线结合最小二乘法对大气能见度进行测量,与单基线测量相比,对于噪声环境的适应性更强.针对多基线测量和单基线测量两种模型的理论误差进行分析.

##### 1) 多基线测量

假设

$$\begin{cases} x_i = -L_i \\ y_i = \ln T_i \\ a_1 = \sigma \end{cases} \quad (9)$$

且等精度测量值  $y_i$  所有的  $\sigma$  都相同,可用  $y_i$  的标准偏差  $S$  来估计,于是可得  $y_i$  的标准偏差为

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - \hat{a}_1 x_i]^2} \quad (10)$$

##### 2) 单基线测量

假设固定基长为  $L_i$ ,其中  $1 < i \leq N$ ,可得单基线的标准偏差为

$$S_0 = \frac{S}{L_i} = -\frac{S}{x_i} \quad (11)$$

图4给出了多基线和标准基线( $L=30\text{ m}$ )测量的方差对比.其中纵轴表示测量的方差值,横轴表示多基线测量的间隔点数(或测量基线数).由图可知间隔点数越多多基线的测量结果的方差越小,测量越准确.以图4(b)为例,当采样点数大于A时,多基线测量的稳定性好于30 m单基线测量.而针对本系统采用的11个间隔点(5 m一个测量间隔),在最大基线为55 m、45 m情况下的理论仿真结果均优于30 m单基线测量.针对最大基线长为30 m的情况,两种测量方法的理论结果基本相同.而在25 m基线长度下,最大基线较短,在采样间隔点较少的情况下,理论方差高于30 m单基线测量结果.如果对系统进行改进,增加测量间隔点数,可使计算方差进一步缩小,其结果优于单基线测量,从而在更短的最大基线空间内获得更稳定的测量结果.

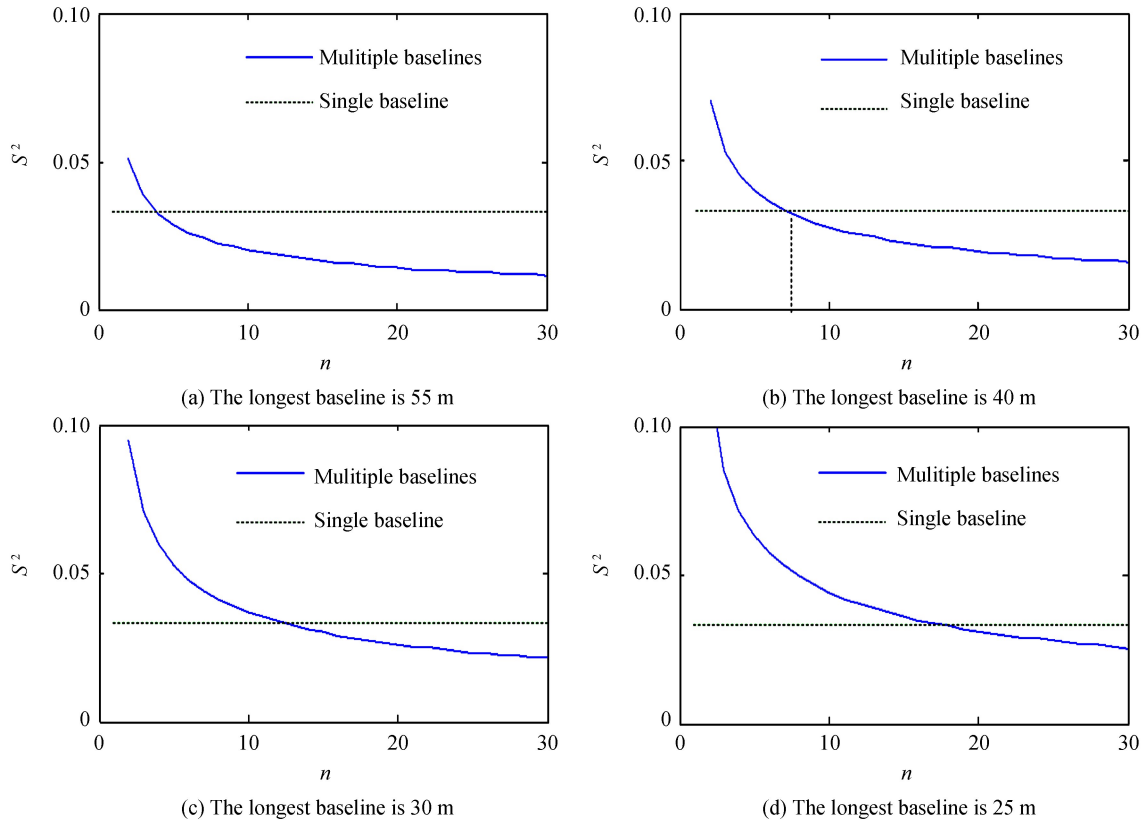


图4 多基线与单基线测量的方差对比

Fig.4 Variances of visibility detection using multiple baselines and single baseline

## 2 加噪仿真

对多基线测量和单基线测量的接收端发射端分别混入高斯白噪声,在不同信噪比情况下对两种方法的准确性进行分析,如图5,信噪比设定为20~50 dB,间隔为2 dB,其中最大基线长度分别选择25 m、30 m、40 m和50 m,测量间隔点为5 m.

从图5中可以看出单基线测量由于其采样空间相对单一,误差表现非常不稳定.而针对三种基线长度,在每个SNR频段中,多基线测量的相对误差都要小于单基线测量,特别是低SNR( $\text{SNR} < 35\text{ dB}$ )的情况下,多基线测量的效果要远远好于单基线测量.其误差范围在 $\text{SNR} > 25\text{ dB}$ 的情况下可以很好地控制在10%以下,在20~25 dB范围内最高不会超过20%.相比而言,单基线测量在低SNR的情况下,相对误差会非常大.同时还可看出,50 m最大基线的多基线测量误差最小,25 m基线的相对误差最大.

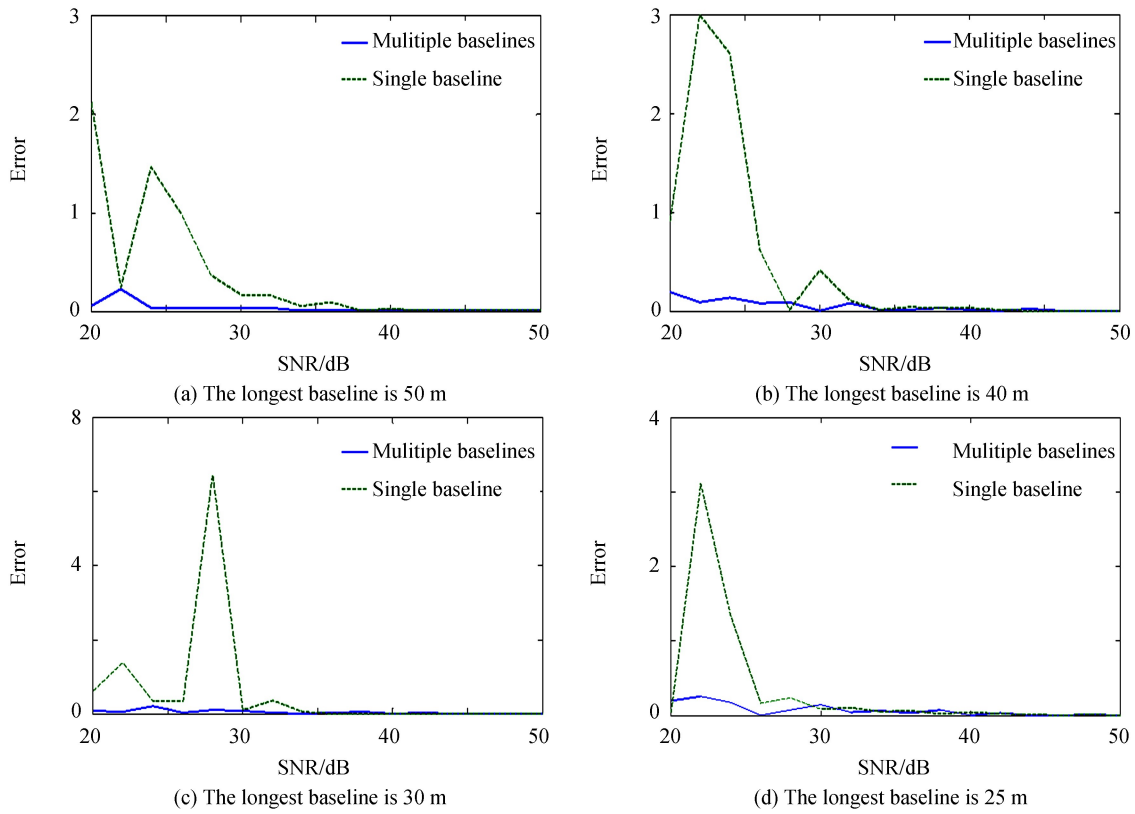


图 5 不同信噪比下多基线测量与单基线测量的误差对比

Fig.5 Errors of visibility detection using multiple baselines and single baseline with different SNR

### 3 实际测量数据

在露天环境下应用多基线能见度标定系统对大气能见度进行测量,针对实际大气环境下的测量结果进行分析.图 6 给出了 2015 年 4 月 11 日和 12 日天津地区对大气能见度环境进行测量的数据结果.其中横坐标表示测量点相对原点的移动距离,纵坐标表示测量透过率的负对数.测量时,设定小车的移动速度为 0.2 m/s,每个间隔点停留时间为 2 s.小车通过反复移动测量对每个基线点进行时间平均,然后通过最小二乘法得到实际能见度.根据数据可得 4 月 11 日所测实际能见度为 6 976. 6 m,4 月 12 日所测的能见度为 10 934. 7 m.与天津机场当天官方查询到的 7 km 和 10 km 的能见度符合得很好.同时由图也可以看出,在更高的能见度情况下,测量信号的起伏已经非常大,采用多基线测量可以在每个基线点进行稳定平均的基础上,通过最小二乘法对多个基线进行平均,从而获得更准确的测量结果.

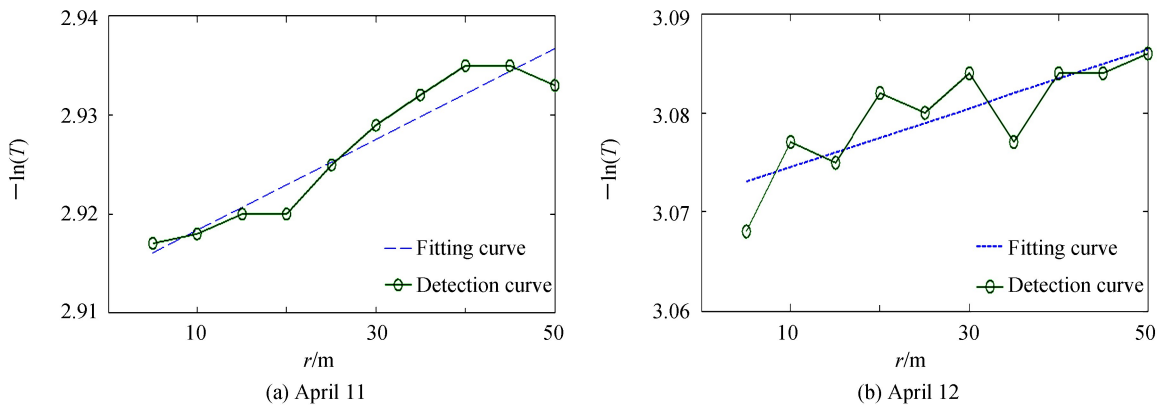


图 6 应用加权最小二乘法对真实数据的能见度计算结果

Fig.6 Visibility calculation with real data using the weighted least squares method

为了更合理地对多基线能见度测试系统进行检测,从2015年3月17日起,每隔7天对系统进行一次试验测评,将多基线测量、单基线测量(30m大气透射仪)以及官方数据三者进行对比.图7给出了三组数据的对比图,从中可以看出多基线测量结果与官方数据最为贴近,其误差走势可以很好地反应实际情况.相比之下,30 m单基线测量由于采样体积的限制以及镜面误差等原因,在实际探测中起伏较大,特别是低能见度(5月5日)时,与官方实际数据差距较大.此外,为了验证多基线测量的鲁棒性,在5月5日,从上午9点起每隔1 h对大气模拟舱进行一次检测对比.图8反映了这一天不同时刻两种方法的探测结果.由于实验期间可认为大气能见度保持不变,因此起伏方差小说明多基线测量具有更好的鲁棒性,与单基线测量相比,其结果更加稳定可靠.

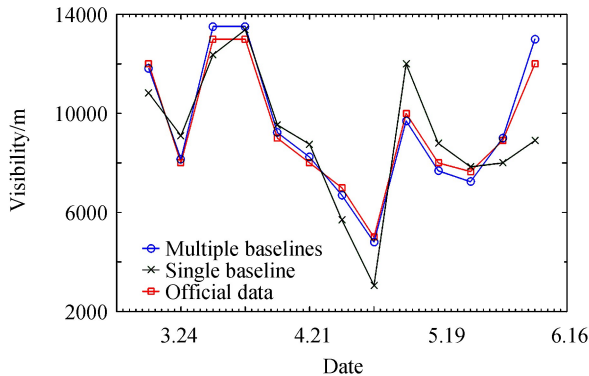


图7 连续时间间隔内多基线、单基线测量结果与机场官方数据的对比

Fig.7 Comparison of the results in multiple baselines, single baseline as well as official data for a period of time

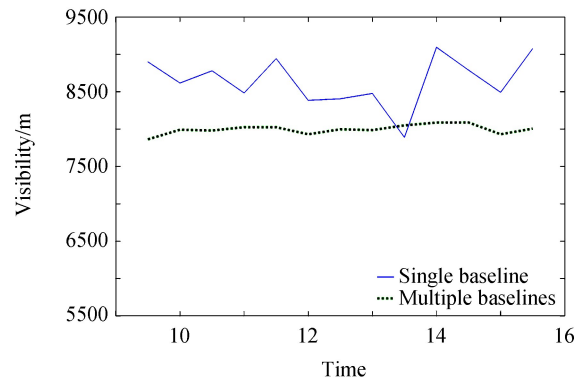


图8 2015年5月5日不同时间的多基线与单基线测量结果对比

Fig.8 Comparison of the results in multiple baselines and single baseline at May 5, 2015

## 4 结论

本文针对单基线测量受噪声及系统稳定性影响较大的缺点,设计搭建了一套基于多基线测量原理的移动式大气能见度测量系统.该系统采用激光作为探测光源,通过移动式的多点测量结合最小二乘法计算大气能见度.整个系统采样体积大,可从理论上消除光学污染误差.通过理论计算与真实环境下的实验验证了该系统的准确性.整套设备精度及稳定性较单基线的大气透射仪有大幅提升,可对能见度进行直接测量,也可作为能见度仪的标定系统使用,对能见度探测的发展有着参考意义.在后续工作中,将对系统外形以及内设结构进行优化,进一步提升其测量的稳定性.

### 参考文献

- [1] LV Li-hui, LIU Wen-qing, ZHANG Tian-shu, *et al.* A new micro-pulse lidar for atmosphere horizontal visibility measurement[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2014, **41**(9):0908005.  
吕立慧, 张文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度[J]. *中国激光*, 2014, **41**(9):0908005.
- [2] XING Xiang-nan, CUI Yan-mei, ZHANG Fu-gen, *et al.* Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology[J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2010, **30**(5):15-20.  
刑向楠, 崔岩梅, 张富根, 等. 能见度测量技术现状及发展趋势综述[J]. *计测技术*, 2010, **30**(5):15-20.
- [3] DONG Li-li, SHI Na, ZHANG Li-dong, *et al.* Influence of tunnel lighting brightness on visibility under low transmittance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2):0222002.  
董丽丽, 石娜, 张立东, 等. 低透过率下隧道照明亮度对能见度的影响[J]. *光子学报*, 2017, **46**(2):0222002.
- [4] LI Zhi-qian, ZHANG Zhi-wei, CHENG Wen, *et al.* Research progress of observation of visibility at sea[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2015, **36**(10):33-36.  
李志乾, 张志伟, 成文, 等. 海上能见度观测研究进展[J]. *自动化仪表*, 2015, **36**(10):33-36.
- [5] ZHANG Jian, ZHANG Guo-yu, ZHANG Jian-liang, *et al.* Optical system error analysis for standard scattering plate calibration system used in calibration visibility meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2):0229002.  
张建, 张国玉, 张建良, 等. 用于校准能见度仪的标准散射体定标系统中光学系统的误差分析[J]. *光子学报*, 2017, **46**(2):0229002.
- [6] ZHUANG Zi-bo, HUANG Wei, FU Chao. Portable visibility detector based on backward scattering lidar[J]. *Laser Technology*, 2015, **39**(1):119-123.

- 庄子波, 黄炜, 符超. 后向散射式小型激光雷达能见度仪探测研究[J]. 激光技术, 2015, **39**(1):119-123.
- [7] WANG Min, ZHANG Shi-guo, WANG Wei, *et al.* Comparison between indicating values of multiple forward scattering visibility meters and their calibration methods[J]. *Meteorological Science and Technology*, **45**(2): 217-222.  
王敏, 张世国, 汪玮, 等. 前向散射式能见度仪示值对比及标定方法研究[J]. 气象科技, **45**(2): 217-222.
- [8] ALEXANDEROS P, ALEXANDROS P, GEORGIOS G. Lidar algorithms for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection, and atmospheric layering measurements[J]. *Applied Optics*, **56**(23):6440-6448.
- [9] PENG P, LI C. Visibility measurements using two-angle forward scattering by liquid droplets[J]. *Applied Optics*, **55**(15):3903-3908.
- [10] XIONG Xing-long, LIU Chun-yuan, JIANG Li-hui, *et al.* Effects of multiple scattering on visibility measurement error of laser-transmissometer[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, **26**(10):2037-2044.  
熊兴隆, 刘春媛, 蒋立辉, 等. 多次散射影响下激光大气透射仪测量误差研究[J]. 光电子激光, 2015, **26**(10):2037-2044.
- [11] CHEN Xiong-ting, LU Chang-hua, ZHANG Yu-jun, *et al.* Design of daytime visibility algorithm for digital camera visibility instrument[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, **27**(4):353-358.  
陈晓婷, 鲁昌华, 张玉均, 等. 数字摄像能见度仪的白天能见度算法设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, **27**(4):353-358.
- [12] WANG Jing-li, LIU Xu-lin, LEI Ming, *et al.* Digital photography visiometer system and comparative experiment[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, **42**(11):2299-2302.  
王京丽, 刘旭林, 雷鸣等. 数字摄像能见度系统及其对比实验[J]. 电子学报, 2014, **42**(11):2299-2302.
- [13] TANG F, MA S, YANG L, *et al.* A new visibility measurement system based on a black target and a comparative trial with visibility instruments[J]. *Atmospheric Environment*, **143**(2016):229-236.
- [14] DU K, WANG K, SHI P. Quantification of atmospheric visibility with dual digital cameras during daytime and nighttime[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(8): 2121-2130.
- [15] DU Chuan-yao, MA Qing-shu, YANG Ling, *et al.* Dual optical path visibility system measuring method and experiment[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, **25**(5):610-617.  
杜传耀, 马舒庆, 杨玲, 等. 双光路能见度测量方法和试验, 应用气象学报, 2014, **25**(5):610-617.
- [16] TIAN Li, LU Hua-yi, GUI Hua-qiao, *et al.* Investigation on one-terminal transmission visibility meter based on using corner reflector[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, **6**(5):390-397  
田林, 陆艺怀, 桂华侨, 等. 基于角反射器的单端透射式能见度仪的研究[J]. 大气与环境光学学报, **6**(5):390-397.
- [17] RAO Rui-zhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **20**(9):2486-2492.  
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, **20**(9):2486-2492.
- [18] LIU Min, WANG Hong-xing, WANG Qian, *et al.* A revision model of the calculation of atmospheric attenuation in water fogs weather[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(10):101-105.  
刘敏, 王红星, 王倩, 等. 雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型[J]. 中国激光, 2011, **38**(10):101-105.
- [19] ROBERTO N. Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(18):3795-3804.
- [20] GRABNER M, KVICERA V. Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(3):513-520.
- [21] BURAS R, MAYER B. Efficient unbiased variance reduction techniques for Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmospheres; the solution[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, **112**(3):434-447.
- [22] KOSCHMIEDER H. Theorie der horizontalen sichtweite[J]. *Beitrage zur Physik der freien Atmosphere*, 1924, **12**: 33-53.
- [23] REN Hong-guang, YU Hai-shan, HUO Li-jun. Extinction characteristic of laser transmitted in fog[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11):1101001.  
任宏光, 于海山, 霍力君. 激光在云雾中传输的消光特性[J]. 光子学报, 2015, **44**(11):1101001.