

文章编号 1004-924X(2016)08-1894-08

## 大气透过率的多点移动测量

台宏达<sup>1,2</sup>, 庄子波<sup>3</sup>, 蒋立辉<sup>1\*</sup>, 孙东松<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300;

2. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

3. 中国民航大学 飞行技术学院, 天津 300300)

**摘要:**考虑大气透射仪的光源不稳定性以及光学准直及大气环境的动态变化均会对其测量精度产生影响,本文在高精度导轨上设计了多点移动大气透过率测量系统,以便提高其大气透过率及消光系数的测量精度。该系统采用可移动测试平台,运用多点移动测量的方式测量大气透过率及消光系数。基于理论比较了多点移动大气透过率测量方法与传统大气透射仪测量方法的测量精度,证明了该系统的测量精度高于传统大气透射仪。将该系统与经过良好校正的 Skopograph II 型大气透射仪在大气环境模拟舱进行了较长时间的对比验证。结果表明,两套系统具有很好的相关性,91.93% 的数据对偏差在 10% 以内,相关系数达 0.985 7。在低能见度条件下,多点移动大气透过率测量系统的测量稳定性优于传统大气透射仪。得到的结果显示:该系统能够满足大气透过率和消光系数测量对准确性、稳定性和一致性的要求。

**关键词:**大气透射仪;大气探测;大气透过率;消光系数;多点移动测量

**中图分类号:**P412.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.1894

## Multi-point mobile measurement of atmospheric transmittance

TAI Hong-da<sup>1,2</sup>, ZHUANG Zi-bo<sup>3</sup>, JIANG Li-hui<sup>1\*</sup>, SUN Dong-song<sup>2</sup>

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Flight Technical College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

\* Corresponding author, E-mail: lhjiang@cauc.edu.cn

**Abstract:** In consideration of the instability of light sources and the effects of optical collimation and atmospheric dynamic change of an atmospheric transmissometer on its measuring accuracy, this paper designs a new multi-point mobile atmospheric transmittance measurement system on a high precision guide rail. This system is based on a mobile measuring platform, and uses the multi point movement model to measure the atmospheric transmittance and extinction coefficient. The measuring accuracies from the proposed multi-point mobile atmospheric transmittance measurement method and from traditional atmospheric transmittance measurement method were analyzed and compared in theory, and the results show that the accuracy of the former is better than that of the latter. Moreover, the multi-point system and Skopograph II transmissometer were compared in a simulation chamber of atmos-

收稿日期:2016-03-28;修订日期:2016-05-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1533113, No. U1433202, No. 41227804, No. 41174130)

pheric environment. The results demonstrate that two systems have an excellent correlation, in which 91.93% of the data is within 10% deviation, and the correlation coefficient is 0.985 7. In low-visibility conditions, the stability of the multi-point system is better than that of traditional transmissometer. It concludes that the multi-point system satisfies the demands of atmospheric transmittance and extinction coefficients for the accuracy, stability and the veracity.

**Key words:** atmospheric transmissometer; atmospheric detection; atmospheric transmittance; extinction coefficient; multi-point movement measurement

## 1 引 言

能见度测量、自由光通信、红外辐射测量、激光测距、激光制导和激光导航等都必须考虑大气对光传输的影响,大气透过率是评价大气中光传输衰减特性的重要参数<sup>[1-2]</sup>。大气透射仪通过测量并计算接收光强与发射光强的比值,可以直接得到大气透过率。与其他大气透过率测量仪器相比,大气透射仪具有信噪比高、采样空间大等优点,且测量结果更为直接和准确。由于符合民用航空对于能见度的高精度测量要求,大气透射仪被广泛应用于民用航空领域<sup>[3]</sup>。

根据所测量的大气透过率,大气透射仪结合相应的基线长度(一般为 15,30,50 或 75 m)可以计算消光系数和能见度<sup>[4]</sup>。大气透射仪测量能见度的误差由能见度、基线长度和大气透过率的测量误差决定。前两个因素造成的误差是由测量原理决定的,与仪器本身的测量性能无关,所以大气透射率的准确测量是大气透射仪准确得到能见度的关键<sup>[5-6]</sup>。光源的强度漂移、波长漂移、窗口污染以及干涉滤光片的透过率特性的温漂变化等会导致接收光信号的微小变化,可引起大气透射仪的测量精度超出要求范围<sup>[7]</sup>。鉴于在测量精度和稳定性、光学污染防护和对准以及地基安装等方面较高的技术要求,国内至今尚无能够进行批量生产的大气透射仪<sup>[8]</sup>。

Vaisala 公司的大气透射仪采用发射光强检测和稳定手段以及窗口污染侦测技术,部分解决了大气透射率测量的稳定性和准确性问题<sup>[9]</sup>。长春气象仪器研究所研制的 TS 型透射表<sup>[10]</sup>在防止透镜表面结霜、精度校准、部件寿命和光轴校准等方面做了较多改进。杨中秋等<sup>[5]</sup>研制了 DT 型大气透射仪,采取了准确定标、分档次处理信号、采

用高分辨率转化器和高性能元器件、恒温等一系列的防护措施,以提升大气透过率的测量精度。施德恒等<sup>[11]</sup>利用激光的相干特性及脉冲特性,采用滤波器及滤波算法和脉冲相干激光来减小系统的电干扰和光干扰,使用性能稳定的光电二极管和 Nd:YAG 激光器来提升透过率的测量精度。肖韶荣等<sup>[3]</sup>通过改变加载到光源的调制信号的幅度,并选择透过率固定的衰减片,扩大了透射仪接收机输入端的信号变化范围,提升了大气透过率和能见度的测量准确性。程绍荣等<sup>[8]</sup>通过在大气透射仪的发射端使用固定频率的脉冲信号源调制光强信号,减小了信号源的频率变化和幅度变化,采用自动光功率控制电路输出功率稳定的光信号,在接收端使用 PIN 管等低噪声和高稳定性的器件和电路结构,控制减小接收信号的电路输出噪声。王宗俐等<sup>[6]</sup>和赵力等<sup>[12]</sup>分别使用反射镜和位移调节器对大气透过率进行差分测量,提高了系统的抗环境污染能力和灵敏度。田林等<sup>[13]</sup>采用角反射器的单端透射式能见度测量方案,利用锁相放大技术抑制噪声,提高了大气透过率的测量精度。

本文考虑了大气透射仪的测量原理、误差影响因素及上述文献设计系统的优点,从提高大气透过率测量精度出发,设计了多点移动大气透过率测量方法,理论上降低了系统的硬件性能对大气透射仪测量精度的影响,提高了大气透过率的测量精度。然后设计了多点移动大气透过率测量系统,将激光发射端与光电接收端安装在高精度滑轨上,降低了长基线光学收发系统准直问题的影响;在大气透过率的测量处理上采用多点测量的方式,降低了光源不稳定的影响,减小了测量系统误差。该系统采用多点多次测量和最小二乘拟合的方式得到大气消光系数,减小了环境变化对消光系数和能见度测量结果的影响。

## 2 多点移动测量方法

### 2.1 多点移动大气透过率测量

多点移动大气透过率测量方法通过测量不同距离处的大气透过率,得到大气透过率与基线长度的关系数组,进而得到精确的大气透过率和大气消光系数。

在多点移动透过率测量过程中,首先将移动接收端移动至位置 0 点处,此时光从激光发射端发出后不经过工作大气,直接传输到移动接收端的光电探测器。令  $T_0$  表示此时系统所产生的光能量的衰减,即由系统本身(不包含大气衰减)所造成的光能衰减为:

$$T_0 = P(0) - P_r(0), \quad (1)$$

式中:  $P(0)$  表示初始状态时激光发射端的发射功率;  $P_r(0)$  表示移动接收端位于位置 0 点时光电探测器接收到的功率,此时的测量基线长度为 0。

移动接收端每移动 5 m 测量一次,共测量 10 个点,令  $P_1(0) \sim P_n(0)$  表示移动接收端在不同位置点处停留时,激光发射端的功率;  $P_r(1) \sim P_r(n)$  表示移动接收端在不同位置点处停留时,移动接收端接收到的功率,如图 1 所示。

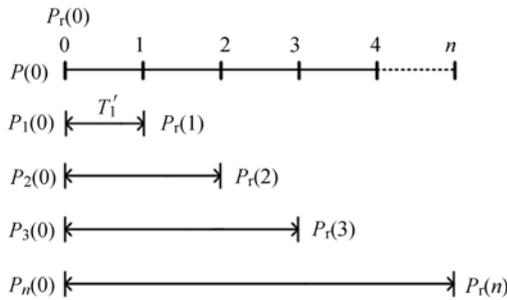


图 1 多点移动大气透过率测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-point mobile atmospheric transmittance measurement

当接收端移动到第 1 点时(5 m 基线长度),光电探测器的测量值为  $P_r(1)$ ,则有:

$$T_1 = P_1(0) - P_r(1), \quad (2)$$

其中  $T_1$  为此时整个测量系统产生的总的光衰减量,既包含了 5 m 基线长度的大气所造成的光衰减量  $T_1'$ ,也包含了系统本身所产生的光衰减量  $\frac{P_1(0)}{P(0)} T_0$ ,即:

$$T_1 = T_1' + \frac{P_1(0)}{P(0)} T_0. \quad (3)$$

因此,考虑到系统本身产生的光衰减量,可认为激光发射端的实际发出功率为  $P_1(0) - \frac{P_1(0)}{P(0)} T_0$ ,此时大气透过率表示为:

$$\tau = \frac{P_r(1)}{P_1(0) - \frac{P_1(0)}{P(0)} T_0} = \frac{P(0) \cdot P_r(1)}{P(0) \cdot P_1(0) - P_1(0) \cdot T_0}. \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)可以得到:

$$\tau = \frac{P(0) \cdot P_r(1)}{P_1(0) \cdot P_r(0)}. \quad (5)$$

可以认为一次移动测试过程中,待测的大气透过率保持均匀且不变,则移动接收端在第 1 个测量点(5 m 基线长度)时的待测大气透过率与第  $n$  个测量点(测量基线长度为  $5 \times n$ )时的待测大气透过率是相同的。类似式(5),移动接收端在第  $n$  个测量点处测得的大气透过率为:

$$\tau = \frac{P(0) \cdot P_r(n)}{P_n(0) \cdot P_r(0)}, \quad (6)$$

式中:  $P_n(0)$  为移动接收端在第  $n$  个测量点(测量基线长度为  $5 \times n$ )时激光发射端的发射功率,  $P_r(n)$  为移动接收端在第  $n$  个测量点处接收到的功率。根据式(6),移动透过率测量方法可以得到  $n$  组大气透过率。

### 2.2 大气透过率测量精度比较

传统的定基线大气透射仪的大气透过率对数的系统误差为:

$$\ln \tau = \ln P(r) - \ln P(0) = -\delta(\lambda) \cdot r, \quad (7)$$

$$\Delta \ln \tau = \frac{1}{P(r)} \Delta P(r) + \left[ \frac{-1}{P(0)} \right] \Delta P(0), \quad (8)$$

其中:  $\Delta P(r)$  表示基线为  $r$  的大气透射仪接收端的系统误差,  $\Delta P(0)$  表示大气透射仪发射端的系统误差。

多点移动大气透过率测量的大气透过率对数的系统误差为:

$$\ln \tau = \ln P(0) + \ln P_r(n) - \ln P_n(0) - \ln P_r(0). \quad (9)$$

对式(9)取偏导可得到其透过率对数的系统误差为:

$$\Delta \ln \tau = \frac{1}{P(0)} \Delta P(0) + \frac{1}{P_r(n)} \Delta P_r(n) - \frac{1}{P_n(0)} \Delta P_n(0) - \frac{1}{P_r(0)} \Delta P_r(0). \quad (10)$$

若认为在一次移动测量过程中,系统的测量为等精度测量,即  $\Delta P(0)$  和  $\Delta P_n(0)$  均为激光器的系统误差,用  $\Delta P(0)$  表示; $\Delta P_r(n)$  和  $\Delta P_r(0)$  均为光电探测器的系统误差,用  $\Delta P(r)$  表示,则公式(10)可以表示为:

$$\Delta \ln \tau = \left[ \frac{1}{P_r(n)} - \frac{1}{P_r(0)} \right] \Delta P(r) + \left[ \frac{1}{P(0)} - \frac{1}{P_n(0)} \right] \Delta P(0). \quad (11)$$

比较式(11)与式(8),将多点移动透过率测量方法的大气透过率对数误差的接收端部分与定基线大气透射仪的大气透过率对数误差的接收端部分相比,结果小于 1,即:

$$\left[ \frac{1}{P_r(n)} - \frac{1}{P_r(0)} \right] \Delta P(r) \Big/ \frac{1}{P(r)} \Delta P(r) = \frac{P_r(0) - P_r(n)}{P_r(n) \cdot P_r(0)} \times P(r) = \frac{P_r(0) - P_r(n)}{P_r(0)} < 1. \quad (12)$$

同理,将多点移动透过率测量方法的大气透过率对数误差的发射端部分与定基线大气透射仪的大气透过率对数误差的发射端部分相比,结果远小于 1,即:

$$\left[ \frac{1}{P(0)} - \frac{1}{P_n(0)} \right] \Delta P(0) \Big/ \frac{-1}{P(0)} \Delta P(0) = \frac{P(0) - P_n(0)}{P(0) \cdot P_n(0)} \times P(0) = \frac{P(0) - P_n(0)}{P_n(0)} \ll 1. \quad (13)$$

因此,多点移动透射式测量的大气透过率对数的系统误差明显小于传统定基线大气透射仪测量的大气透过率对数的系统误差,多点透射式大气透过率测量方法可以有效提高大气透过率的测量精度。

### 2.3 大气消光系数计算

传统的大气透射仪通常采用单点多次平均的方式测量消光系数,降低测量的随机误差,其计算公式可展开为:

$$\sigma = - \frac{\overline{\ln \tau}}{r} = - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \tau_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i} = - \frac{\sum_{i=1}^n \ln \tau_i}{\sum_{i=1}^n r_i}. \quad (14)$$

使用多点移动大气透过率测量方法和线性拟合方法,可以同时降低系统误差和随机误差,得到更为精确的大气消光系数。

根据最小二乘法原理,使残差平方和最小,即:

$$\sum_{i=1}^n [\ln \tau_i - (-\sigma \cdot r_i)]^2 = \sum_{i=1}^n (\ln \tau_i + \sigma \cdot r_i)^2 = Min. \quad (15)$$

由于式(15)的二阶偏导恒大于 0,即:

$$\frac{\partial^2 \sum_{i=1}^n (\ln \tau_i + \sigma \cdot r_i)^2}{\partial \sigma^2} = 2 \cdot \frac{\partial \sum_{i=1}^n r_i (\ln \tau_i + \sigma \cdot r_i)}{\partial \sigma} = \sum_{i=1}^n 2r_i^2 > 0. \quad (16)$$

因此,式(15)有极小值。令其一阶偏导为 0,可以得到系统所测量的大气消光系数  $\sigma$ ,即有:

$$\sum_{i=1}^n (r_i \cdot \ln \tau_i) + \sum_{i=1}^n (\sigma \cdot r_i^2) = 0, \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2}. \quad (18)$$

可以看到,式(14)是式(18)中  $r$  为固定值时的特例,即多点透射式能见度测量系统与单点多次能见度测量系统从基本原理上是一致的,二者都可以降低随机误差。但如 2.2 所述,基于多点移动并最小二乘法的消光系数测量方法在降低随机误差的同时,也降低了系统误差,从而使消光系数和能见度的测量结果更具连续性,二者的连续变化过程能够更好地体现大气消光特性的变化。

## 3 系统实现

根据多点移动大气透过率测量方法,建立了多点移动大气透过率和消光系数测量系统。该系统由激光发射端和移动式接收端、高精导轨、通信子系统及其他子系统组成,如图 2 所示。

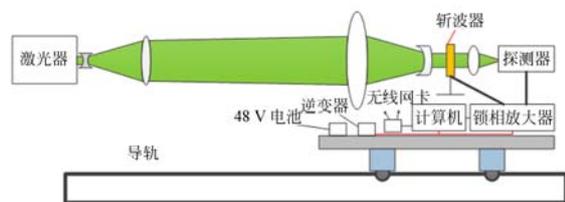


图 2 多点移动大气透过率和消光系数测量系统构成示意图

Fig. 2 Schematic of multi-point mobile atmospheric transmittance and extinction coefficient measurement system

系统的光路部分主要由激光器、光学斩波器、

锁相放大器和收发透镜组组成。激光经扩束透镜和反射镜组成的光路系统进行扩束、发散角压缩及准直后,沿导轨方向发射。光学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安装于移动式接收端的锁相放大器参考通道中。透过大气后激光光束由接收透镜组接收,探测器的信号接入锁相放大器的信号通道,进行光能量的采集。系统主要部件参数见表 1。

表 1 系统主要部件参数

Tab.1 Parameters of system main components

主要部件	参数指标	
激光器	波长	$(532 \pm 1) \text{ nm}$
	发散角	$< 1.2 \text{ mrad}$
	光斑直径	$\sim 2.0 \text{ mm}$
光学斩波器	斩波频率	$20 \sim 1 \text{ kHz}$
	叶片槽角度	$18^\circ$
	数据位	8
锁相放大器	满量程灵敏度	$1 \text{ nV} \sim 1 \text{ V}$
	输入信号频率范围	$1 \text{ mHz} \sim 100 \text{ kHz}$
光电探测器	波长范围	$350 \sim 1100 \text{ nm}$
	输出电压	$0 \sim 10 \text{ V}$

为了降低激光器能量波动的影响,这里采用一路分光进行动态监测的方法,将监测光束和测量光束分别由两个同型号探测器接收。激光器出射光束经过斩波器后分成两路,大部分出射后作用于工作大气,小部分反射后由透镜汇聚到探测器表面进行探测。探测器的输出信号接入锁相放大器中,两路接入信号进行锁相差分,得出的结果为两个探测器探测到能量之差。

导轨由两根长 55 m,间距为 0.35 m 的高精度钢构组成,移动式接收端可在导轨上平稳移动。在导轨一侧每隔 5 m 安装感应片,接近传感器和感应片组合的检测方式可以实现移动式接收端的精确定位。以接近传感器和感应片的安装误差 2 mm 计算,当测量基线长度取 5 m 时,安装误差所造成的基线长度偏差为 0.04%,且该偏差随着测量基线长度的增大逐渐减小。

移动式接收端装有嵌入式工控机,通过无线网络连接控制室服务器。服务器设置移动式接收端系统参数,控制移动式接收端工作,监控工作状态,收集并记录测量数据。系统工作流程如图 3 所示。

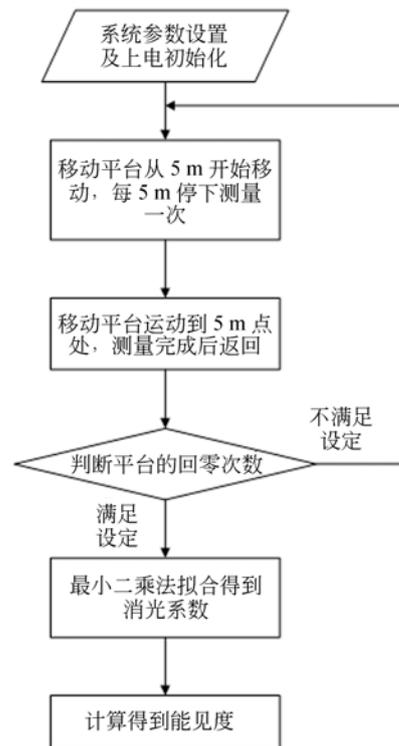


图 3 系统测量流程图

Fig.3 Flow chart of system measurement

## 4 数据对比

由于大气透过率是大气透射仪测量的重要中间量,而大气透射仪常以能见度作为输出结果,因此考虑数据的常见性,以系统输出的能见度值进行比对。

根据 Koschmieder 定律,结合 WMO 和 ICAO 的相关建议<sup>[14]</sup>,取人眼对比视觉阈值  $\epsilon = 0.05$ ,大气消光系数和能见度的关系为:

$$V = -\frac{\ln \epsilon}{\delta} = \frac{3}{\delta}, \quad (19)$$

式中:  $V$  为能见度,  $\delta$  为大气消光系数。传统大气透射仪的  $V$  和  $\delta$  由式(14)计算得到,多点移动大气透过率测量系统由式(18)计算得到。

中国民航大学大气环境模拟舱配备完整的气流循环系统、大容量超声波雾化发生器以及烟雾、粉尘和黑碳气溶胶发生器,可使舱内能见度条件在 1.2 h 内从 10 000 m 下降到 3 000 m 以下,在 5 h 内下降到的 200 m 以下,从而形成各类雾、霾等均匀低能见度天气,缩短实验测试周期。

Skopograph II 型大气透射仪的光源使用脉

冲氙灯,可以测量大气透过率并计算消光系数,能见度测量距离为 7.5~3 000 m,平均采样时间为 1 min。在每天测试之前仪器均经过了完整的镜头清洁及校正,测量基线设置为 50 m。



图 4 大气模拟舱实物图

Fig. 4 Photo of atmosphere environment simulation chamber

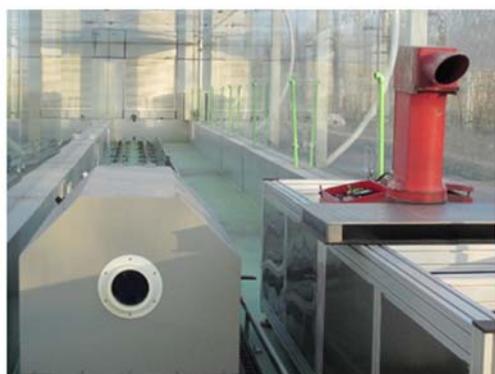


图 5 移动测试平台与 Skopograph II 型大透实物图

Fig. 5 Photo of mobile measuring platform and Skopograph II transmissometer

将多点移动大气透过率测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪同时放置于大气环境模拟舱中,进行能见度测量对比试验,实验装置图分别如图 4 和图 5 所示。在每次试验时,大气环境模拟舱使用 ATM-241 雾化气溶胶发生器,配以 NaCl 及去离子水组成的溶剂持续向大气环境模拟舱喷入气溶胶粒子。多点移动大气透过率测量系统的移动接收端的运动速度设置为 0.4 m/s,每点停留时间设置为 3 s,接收端每往返两次做一次最小二乘拟合,从而得到大气透过率、消光系数及所对应的能见度值,一次完整的测量结果输出时间约为 10 min。Skopograph II 型大气透射仪的测量数据由 3 000 m 开始发生改变时记录数

据,在一个月的测量对比实验中,共得到能见度对比数据 285 组,各能见度区间的测量组数如表 2 所示,能见度对比偏差如表 3 所示。

表 2 能见度区间数据组分布

Tab. 2 Distribution of data pair in visibility range

能见度区间/m	测量组数/组	占比/%
1 000~3 000	101	35.4
500~1 000	40	14.0
350~500	42	14.7
250~350	63	22.1
200~250	39	13.7

表 3 数据对比偏差分布

Tab. 3 Distribution of data pair deviation

偏差范围/%	数据对数量(组)	占比/%
<10	262	91.93
10~20	9	3.16
>20	14	4.91

多点移动大气透过率测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪的数据对比如图 6 所示。在图 6 的 3 条斜线中,中间虚线为多点大气透过率测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪测量结果的等值线。两条实斜线为两种测量系统偏差 10% 以内的点的分布线。91.93% 的测量结果位于 10% 的偏差分布线范围以内。两种仪器的测量结果的相关系数为 0.985 7。

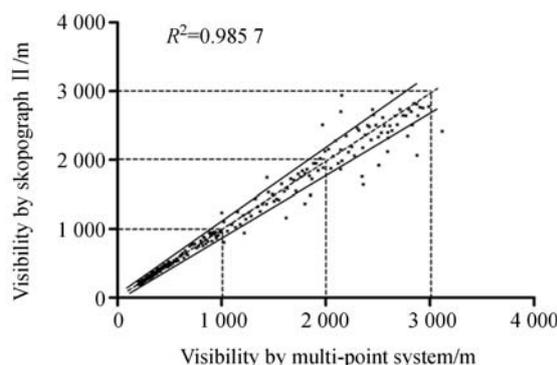


图 6 多点移动大气透过率测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪的测量结果对比

Fig. 6 Comparison of measuring results between multi-point atmospheric transmittance measurement system and Skopograph II transmissometer

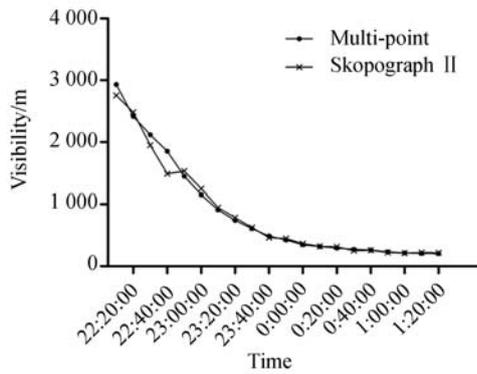


图 7 大气模拟舱内一次对比试验数据

Fig. 7 Data of one comparison experiment in atmosphere environment simulation chamber

图 7 是大气模拟舱内一次对比试验中两种测量仪器的测量结果。在能见度由 3 000 m 降至 200 m 的过程中,多点移动大气透过率测量系统的能见度始终保持均匀变化,特别是在能见度值高于 1 000 m 时。与 Skopograph II 型大气透射仪相比,基于最小二乘拟合方法,多点移动大气透过率测量系统在连续测量过程中同时减小了系统

误差与随机误差,故其测量结果的波动性较小,更好地反映了实验过程中模拟舱内能见度的连续变化趋势。

## 5 结 论

本文设计了一种多点移动大气透过率测量系统,采用可移动测试平台,运用多点移动测量的方法测量大气透过率及消光系数。经系统设计与误差分析,该系统可以有效降低传统定基线大气透射仪的光学准直度不稳定、光源稳定性波动及环境变化等因素对大气透过率及消光系数测量结果的影响。该系统与 Skopograph II 型大气透射仪在大气环境模拟舱中进行了较长时间的对比试验。结果表明,91.93%的测量结果位于 10% 的偏差分布线范围以内,两种仪器的测量结果的相关系数为 0.985 7。多点移动大气透过率测量系统可以有效测量大气透过率和消光系数,具有较好的准确性、一致性和稳定性。

## 参考文献:

- [1] 刘俊池,李洪文,王建立,等.中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J].光学精密工程,2015,23(6):1547-1557.  
LIU J CH, LI H W, WANG J L, et al.. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1547-1557. (in Chinese)
- [2] 杨词银,张建萍,曹立华.基于大气透过率比例校正的目标辐射测量[J].光学精密工程,2012,20(7):1626-1635.  
YANG C Y, ZHANG J P, CAO L H. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1626-1635. (in Chinese)
- [3] 王宗俐,曹乃锋,王春录.一种激光能见度仪设计的新方法[J].激光与红外,2012,42(6):629-632.  
WANG Z L, CAO N F, WANG CH L. New design of laser instrument for detecting the visibility[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(6):629-632. (in Chinese)
- [4] 肖韶荣,吴群勇,周佳,等.透射式能见度仪动态范围扩展方法[J].应用光学,2014,35(4):574-579.  
XIAO SH R, WU Q Y, ZHOU J, et al.. Method to extend dynamic range of transmittance meter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4):574-579. (in Chinese)
- [5] SECRETARIAT W M O. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*[S]. World Meteorological Organization, 2008.
- [6] 杨中秋,王庆安,牛利平,等.DT型大气能见度记录仪的研制和精度分析[J].气象科学,1990,10(1):52-60.  
YANG ZH Q, WANG Q A, NIU L P, et al.. Develop and accuracy analysis of DT atmospheric visibility recorder[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 1990, 10(1):52-60. (in Chinese)
- [7] 谢邦力,王青梅,李晶华.单基线双光路透射表[C].中国气象学会年会,2005:245-255.  
XIE B L, WANG Q M, LI J H. Single baseline double light path transmissometer[C]. *Chinese Meteorological Society Annual Meeting*, 2005:245-255. (in Chinese)
- [8] 程绍荣,魏全忠,吕军.一种实用型大气透射式能见度仪的研制[J].光电工程,2011,38(2):144-150.  
CHENG SH R, WEI Q ZH, LÜ J. The develop-

- ment of a new atmosphere transmittance meter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 144-150. (in Chinese)
- [9] ENGEL S, HEYN K. Measurement of atmospheric transmission and determination of visual range:UK, 2410795A[P]. 2005.
- [10] 孙耀东,李虹. TS型透射表现场使用中的技术问题分析[J]. 气象水文海洋仪器, 1998(4):17-22. SUN Y D, LI H. Technical problem analysis of TS transmissometer in field use[J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instrument*, 1998(4):17-22. (in Chinese)
- [11] 施德恒,黄宜军. 透射式跑道能见度激光测量仪的研究[J]. 光学技术, 1998(5):79-82. SHI D H, HUANG Y J. A study of the transmission laser detection instrument for runway visual range[J]. *Optical Technique*, 1998(5):79-82. (in Chinese)
- [12] 赵力,万晓正,齐勇,等. 多次反射法透射式能见度测量系统研究[J]. 山东科学, 2011, 24(6): 67-70. ZHAO L, WAN X ZH, QI Y, et al.. Design of multi-reflection transmission method based visibility measurement system [J]. *Shandong Science*, 2011, 24(6):67-70. (in Chinese)
- [13] 田林,陆亦怀,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, 2011, 6(5): 390-397. TIAN L, LU Y H, GUI H Q, et al.. Investigation on one-terminal transmission visibility meter based on using corner reflector[J]. *Journal of Atmospheric & Environmental Optics*, 2011, 6(5): 390-397. (in Chinese)
- [14] INTERNATIONAL C A O. *Meteorological service for international air navigation*[S]. International Civil Aviation Organization, 2013.

#### 作者简介:



台宏达(1986—),男,山东临清人,博士研究生,讲师,2007年、2010年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要从事航空气象、大气探测等方面的研究。E-mail: hdtai@cauc.edu.cn

#### 导师简介:



孙东松(1962—),男,江苏江阴人,博士,教授,博士生导师,1987年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光大气遥感、激光雷达技术等研究工作。E-mail: sds@ustc.edu.cn

#### 通讯作者:



蒋立辉(1964—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,教授,硕士生导师,1993年、2001年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光雷达、图像处理、光电子技术等研究工作。E-mail: lhjiang@cauc.edu.cn