

基于积分球光源的能见度测量系统设计与实现

叶开^{1,2}, 杨玲^{1,2*}, 甄小琼^{1,2}, 郝勤正^{1,2}

¹成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225;

²中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225

摘要 同源双光路能见度仪是一种基于数字摄像法的能见度仪,其光源和光路系统会直接影响能见度的反演结果。针对系统中因光源和分光系统不稳定造成的反演误差,以积分球光源作为同源双光路能见度仪的改进光源,采用远近反射端对积分球光源进行分光,提取相机拍摄到的远近光斑并代入 Koschmieder 公式求解。试验结果表明:积分球光源与 LED 光源相比,减小了 5% 的均匀性误差。在不同能见度条件下,将基于积分球光源的能见度测量系统与 LT-31 透射式能见度仪、VPF-730 散射式能见度仪进行场外对比试验,结果表明,基于积分球光源的能见度测量系统的均方根相对偏差和相对平均偏差都远小于 20%,符合世界气象组织对能见度仪测量准确度的误差要求。

关键词 大气光学; 能见度; 同源双光路; 积分球; 反射端; 均匀性

中图分类号 P412.17 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP56.240104

Design and Implementation of Visibility Measurement System Based on Integrating Sphere Light Source

Ye Kai^{1,2}, Yang Ling^{1,2*}, Zhen Xiaoqiong^{1,2}, Hao Qinzheng^{1,2}

¹College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology,
Chengdu, Sichuan 610225, China;

²CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu, Sichuan 610225, China

Abstract The single-light-source dual-optical path visibility meter is a kind of camera type visibility meters, and its light source and optical path system directly affect the accuracy of visibility inversion. In view of the error caused by the instability of the light source and the split light path in the original system, the integrating sphere is used as the improved source of the single-light-source dual-optical path visibility meter, and the near and far reflection end is used to split an integrating sphere light source. The near and far light spots captured by the camera are extracted and brought into Koschmieder's law. The experimental results show that compared with the LED light source, the integrating sphere light source proposed in this paper reduces the uniformity error by 5%. Compared with the transmission type visibility meter LT-31 and the scattering type visibility meter VPF-730 under different visibility conditions, the root-mean-square (RMS) relative error and relative average error of this scheme are much less than 20%, which is in line with the WMO's error requirement of the visibility meters.

Key words atmospheric optics; visibility; single-light-source dual-optical path; integrating sphere; reflection end; uniformity

OCIS codes 010.7295; 010.1100

1 引言

能见度的准确观测在气象预报、气候监测、农业、交通等领域有着十分重要的意义^[1-2]。传统气象

能见度观测以人工观测为主,具有较强的主观性。因此,能见度的自动测量技术应运而生。自柯西米德定律确立以后,国内外便开始专注于能见度自动测量技术的研究。传统的能见度仪器分为散射式能

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-06-10; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 校选科研项目暨“一带一路”专项基金资助(CRF201705)

* E-mail: cimyang@cuit.edu.cn

能见度仪和透射式能见度仪^[3-5]。其中:散射式能见度仪的气体采样体积小,在较低的气象光学视程条件下的测量误差比透射式能见度仪的大,且容易受降水影响,测量精度较低。透射式能见度仪在低能见度条件下的测量值准确度高于散射式能见度仪,但成本高昂,维护复杂,且要求有较长的基线,很多应用场景都无法满足。因此,既能满足不同的气象环境下又能降低成本的能见度测量方法作为一个新兴课题受到了科研人员的广泛关注^[6-8]。

随着 CCD 图像传感器的广泛应用,数字摄像法测量能见度成为可能^[9-11]。1999 年,谢兴生等^[12]首次提出了数字摄像法自动测量能见度的仪器系统(DPVS),并利用 CCD 数字摄像机采用亮度对比方法计算了大气能见度。Bäumer 等^[13]对全景图像的灰度和边缘进行处理,排除了低太阳角数据,并通过检测图片中不同目标的距离,将平均可见性数据与气象站测量结果进行统计,最终确定了能见度值。徐振飞等^[14]建立了光斑照度映射与图像灰度的数学模型,证明了在数字摄像法自动测量能见度的过程中,所采集的光斑图像灰度值变化区间处于工业 CCD 响应度的线性范围内。2013 年,Du 等^[15]通过拍摄远近两个近似黑体或双相机在不同距离拍摄同一目标,对能见度进行反演。Wang 等^[16]提出了新型 DPVS 系统,通过 CCD 相机获取不同目标与背景目标的图像,通过二者亮度的对比计算得出能见度,该系统在雨天和雾天时相对于前向散射式能见度仪,能见度表现较好。杜传耀等^[17]采用双光路目标物亮度差法消除了单个目标物亮度的缺陷。Tang 等^[18]依照黑体和天空背景之间对比度的数学模型,设计了基于黑体的能见度测量系统,进行了场外比对试验。郝勤正等^[19]采用幅度调制方法设计了调制光源,对 CCD 获取的图片进行解调处理,有效地减小了背景光对能见度反演的影响。

本文提出了一种改进的同源双光路能见度仪测量系统方案,重新设计了系统光源和光路,采用积分球光源取代普通 LED 灯作为系统光源,同时采用 30 m 和 50 m 距离的远近反射端对积分球光源进行分光,减少了由光源不均匀性引起的系统误差,从而提升了能见度的反演效果。

2 测量系统原理和设计

2.1 能见度测量原理

大气能见度的定义有两种:一种是指具有正常视力的人在当时天气条件下能够辨认目标的最大水

平距离;另一种是指目标的最后特征已经消失的最小水平距离。世界气象组织(WMO)和观测方法委员会在 1957 年给出了气象光学视程(MOR)的定义,即:由白炽灯发出的色温为 2700 K 的平行光束的光通量在大气中削弱至初始值的 5%时所通过的路径长度。之后,大气能见度可以用仪器测量,并用 M 表示。消光系数是色温为 2700 K 的白炽光源发出的平行光束经过大气中单位距离的路径时损失的那部分光通量^[20-21]。

根据 Beer-Lambert 定律,平行光在均匀大气中的衰减可表示为

$$F = F_0 \exp(-\sigma L), \quad (1)$$

式中: F 为光通量的衰减; F_0 为光源出射的初始光通量; L 为光在均匀大气中的传播距离; σ 为消光系数。只要保证 CCD 相机处于线性工作区,拍摄到光斑的亮度就与实际光通量呈线性关系,则可得

$$\sigma = \frac{\ln \frac{F_0}{F}}{L}. \quad (2)$$

可由 Koschmieder 公式得到 M ,即

$$M = \frac{-\ln \epsilon}{\sigma}, \quad (3)$$

式中: ϵ 为亮度对比阈值,通常取 0.05。

2.2 光源和光路设计

积分球是一种常用的光学仪器——内壁涂有漫反射涂料(一般为硫酸钡涂层)的空腔球体。进入积分球腔体的光经内壁多次漫反射后可在出光口得到均匀照度的光束。在之前的能见度仪设计中,积分球常被作为 CCD 面均匀性测试器件,在均匀性测试试验中发现:积分球辐射出的光照度分布均匀^[22-23]。由于经过积分球漫反射的光束具有较好的均匀性,可提高同源双光路能见度测量系统的分光稳定性,因此将积分球光源作为本方案的改进光源。

由图 1 可见,LED 光源被白色反射板阻挡后在腔体内发生多次漫反射,最后到达出光口。

$$E = \frac{\Phi}{4\pi R^2} \times \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad (4)$$

式中: E 为积分球腔内任一点的照度; Φ 为 LED 光通量; R 为腔体内径; α 为腔内涂层的反射比。理想情况下,LED 入射光的入射角、位置分布不会对输出光束的均匀性造成影响。当 LED 光亮度一定时,为获得强度处于 CCD 光响应线性区的光束,需要对积分球出光口的面积进行设计。本文设计的积分球

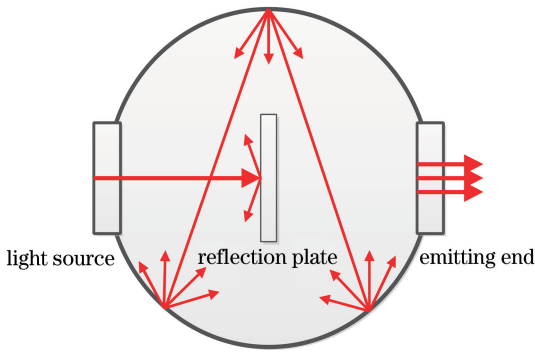


图 1 积分球光源设计

Fig. 1 Integral sphere light source design

的出光口径为 30 mm,腔体内径为 300 mm。光源出光口到远近反射端的距离分别为 50 m 和 30 m,所以出光口的大小仅需考虑出光口处光束的强度。LED 功率选择 8 W,色温为 2700 K,相机在高能见度时固定快门拍摄,远近光斑不存在过曝现象,由此保证了 CCD 工作在线性区。

系统中 30 m 和 50 m 的分光光路满足将光源近似视为点光源的条件,因此积分球光源发出的光

束可以认为是平行光,满足世界气象组织对 M 的定义条件。远近反射端基座是半径为 0.1 m、高度为 1 m 的钢柱,可以减小风等导致的反射端腔体的抖动;上端是边长为 0.25 m 的方形空心腔体,里面有一个半径为 0.05 m 的圆孔,孔内安装反光棱镜。此腔体设计能够有效阻挡风雨和灰尘对反射端的影响。积分球光源射出的光束水平传播至远近两个反射端的光学棱镜,然后平行反射至 CCD,此时 CCD 采集的是经过棱镜同源分光后的远近光斑。同源双光路能见度测量系统通过测量光源所经光路的大气衰减来反演能见度。在该系统中,由于光源所经光路是来回反射的,因此通过这样的发射-反射-接收的方式可以使基线增加一倍,即实际远近基线长度分别为 100 m 和 60 m。通过加固整体光路保证了光源的稳定。腔体内壁涂层为黑色吸光材料。系统光源和光路如图 2 所示。两个反射端相对于光源错开放置,近反射端位于光源系统的正前方,远反射端距离中轴线 0.45 m,所以近处反射端不会挡住远处反射端接收光源发出的光。系统光源与光路俯视图如图 3 所示。

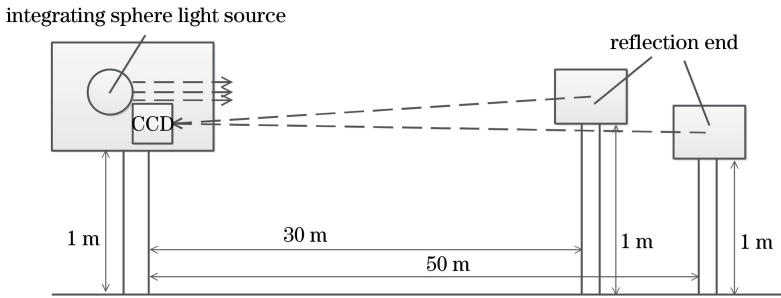


图 2 光源和光路设计

Fig. 2 Light source and light path design

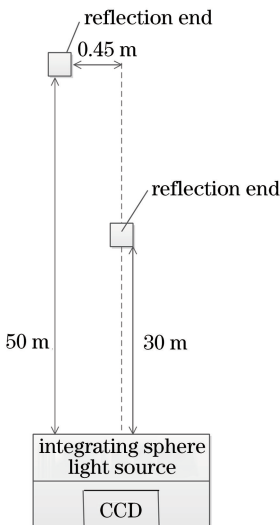


图 3 光源和光路俯视图

Fig. 3 Top view of light source and light path

2.3 系统设计和实现

本系统主要由光源系统、反射端、图像采集系统及数据处理系统组成。光源系统提供同一光源给远近反射端,图像采集系统完成目标物的拍摄,数据处理系统对数据进行处理,最终输出反演的能见度值。系统整体框架见图 4。

其中,积分球光源系统和远近反射端已在前一小节中详细介绍,这里不再赘述。图像采集系统包括工业 CCD 相机和镜头,采用西安维视数字图像技术有限公司生产的 MV-VS142FC 进行图像采集。相机最高分辨率为 1392 pixel×1040 pixel,传感器类型属于逐行扫描 CCD,输出 Bayer 彩色,即每个像素均有 RGB 三通道,可连续高速采集图像。相机可直接通过 1394 接口由计算机(PC)机供电,方便 PC 机控制。数据处理系统时以 CCD 采集到的图像

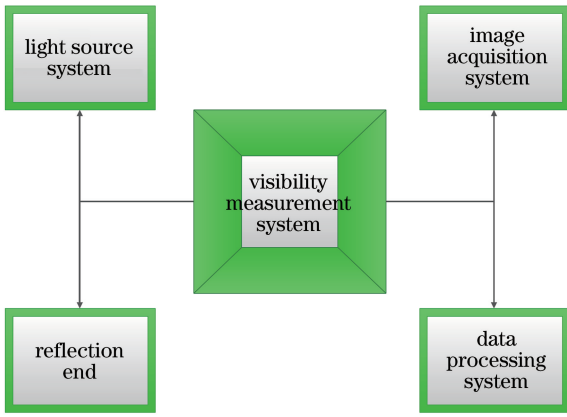


图 4 系统概图

Fig. 4 Schematic of the system

为输入,能见度值为输出的系统,主要将CCD拍摄到的

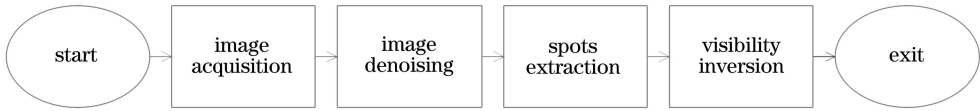


图 5 数据处理流程图

Fig. 5 Data processing flow chart

3 试验结果分析

3.1 室内光源均匀性试验

双光路能见度仪反演模型采用远近光斑进行分光,而非计算单独光斑的亮度值。不均匀的光源会导致远近反射端分光比发生变化,而这种变化并非由大气能见度引起,所以选择均匀性越好的光源越能减小系统误差。为比较两种光源均匀性误差,将

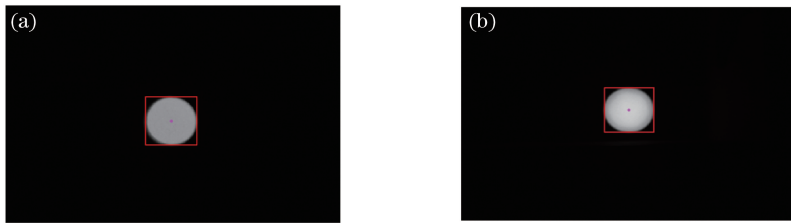


图 6 不同光源拍摄的光斑。(a)积分球;(b)LED

Fig. 6 Light spots. (a) Light spot taken from the integrating sphere light source; (b) light spot taken from the LED light source

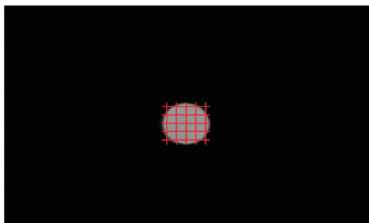


图 7 光斑分割

Fig. 7 Light spot segmentation

图像进行图像处理,根据重心取远近光斑框,分割出光源的光斑成像,并计算光斑亮度信息,根据能见度反演公式反演出能见度数据。数据处理系统流程图如图 5。

根据(1)式,距离光源为 d_1 和 d_2 处的反射端光斑亮度分别为 I_1 和 I_2 ,则有

$$I_1 = I_0 \exp(-\sigma d_1), \quad (5)$$

$$I_2 = I_0 \exp(-\sigma d_2), \quad (6)$$

式中: σ 为均匀大气消光系数; I_0 为光源出射光。联立(5)、(6)式可求得消光系数为

$$\sigma = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{d_2 - d_1}. \quad (7)$$

将通过同源双光路系统测得的消光系数 σ 代入到(7)式即可得到大气能见度 M 。

积分球光源与 LED 光源进行均匀性比对试验。将积分球光源、LED 光源和 CCD 同轴水平放置于暗室中,以避免太阳光等外界光线的干扰^[24]。将积分球光源开机预热一段时间,固定 CCD 快门后开始进行光源均匀性试验。图 6(a)、(b)分别为积分球光源和 LED 光源的光斑,其中,光斑中心的圆点为光斑重心点,方框为光斑的外切矩形,并以此作间距为 2 个像素点的内切网格,如图 7 所示。

提取光斑内网格交点像素的灰度值,通过计算得到光斑均匀性:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}{n}}{\bar{G}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中: G_i 为第 i 个交点像素的灰度值; n 为交点总个数; \bar{G} 为交点像素的平均灰度值。此时光源的均匀

性误差可以用均匀性表示。在考虑光斑均方根误差时,衡量网格上每个像素点灰度值与平均灰度之间的偏差,此时不应忽略网格边缘与重心的灰度偏差,因此考虑网格重心灰度与4个边界点灰度的偏差。

在图8中,*点表示4个边界点,圆点代表重心点。重心点灰度与边界点灰度均匀性 B' 可表示为

$$B' = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_B - G_C)^2}{4}}}{G_C} \times 100\%, \quad (9)$$

式中: G_B 代表与重心点垂直的4个边界点的灰度; G_C 代表重心点灰度。最终得到的均匀性误差考虑了重心与边界点误差的加权,均匀性误差 U 为

$$U = E + B'. \quad (10)$$

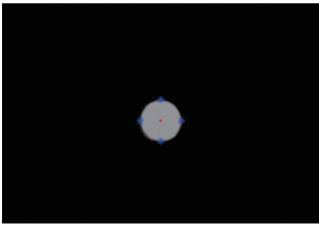


图8 光斑边界点

Fig. 8 Light spot boundary points

当以图6中的圆点像素为重心,网格逐渐向外延伸,直至光斑边缘时,均匀性变化如图9所示。由图9可知,在从重心到边缘的整个延伸过程中,LED光源增加了约5%的误差,且在中后段上升剧烈,而积分球光源的均匀性基本维持稳定。可见,积分球光源设计减小了由光源均匀性造成的分光比变化,能提升能见度反演的准确性。

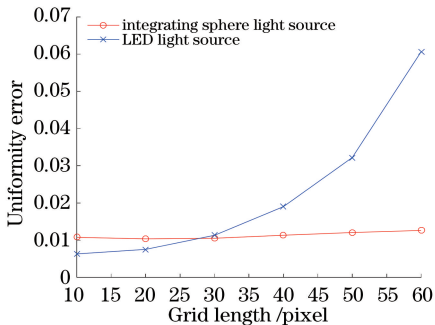


图9 网格边长与均匀性误差关系

Fig. 9 Relationship between grid length and uniformity error

3.2 不同能见度下外场试验的比对分析

1988—1989年,WMO首次组织了大型的能见度仪比对试验,在试验中选取了部分仪器测量的均值作为能见度的标准参考值。目前,国内的比对试

验也是选取仪器测量均值作为标准参考值。2002年,濮江平等^[3]对北京南苑机场的5台能见度仪进行了比对试验,以5套仪器测量值的均值作为参考标准值,分析了这5套仪器在各能见度范围内的标准偏差及趋势。2004年,吕伟涛等^[25]先选取3台透射能见度仪的均值,再将此均值与前向散射式能见度仪的测量值、双亮度差法测量值取平均作为参考标准值进行分析。2014年,Wang等^[16]以DPVS、前向散射式能见度仪、人工观测三者的均值作为参考值进行了一系列的比对分析试验。

本文的试验地点为成都信息工程大学观测场,观测场内有Vaisala公司的LT-31透射式能见度仪、英国Biral公司的VPF-730前向散射式能见度仪,以及本文介绍的以积分球为光源的同源双光路能见度仪。由于学校试验条件限制,没有人工观测数据。按照能见度仪外场比对试验中的常用方法,采用该三种能见度仪的均值作为参考标准值进行比对分析。

本文选用的三种客观评价指标为均方根相对偏差、相对平均偏差和相关系数,它们的计算公式为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{srd} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(M_{exp} - M_{std}) / M_{std}]^2}{n}} \times 100\% \\ A_{srd} &= \frac{\sum_{i=1}^n [(M_{exp} - M_{std}) / M_{std}]}{n} \times 100\% \\ r &= \frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp} - \bar{M}_{exp}) \times (M_{std} - \bar{M}_{std})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{exp} - \bar{M}_{exp})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{std} - \bar{M}_{std})^2}} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: σ_{srd} 为均方根相对偏差; A_{srd} 为相对平均偏差; r 为相关系数; M_{exp} 和 M_{std} 分别为试验值和参考标准值; \bar{M}_{exp} 和 \bar{M}_{std} 分别为试验值和参考标准值的均值。均方根相对偏差和相对平均偏差描述测量值与参考标准值之间的离散程度,这两个值越小,离散性越小。相关系数 r 描述测量值与参考标准值之间的线性相关程度,该值越大,相关性越好。为了评价仪器在各种能见度范围的测量结果,将将(0, 2000 m)、[2000 m, 5000 m)、[5000 m, 10000 m)分别作为低、中、高能能见度,并对不同能见度范围的测量结果进行比对分析。

从图10(a)中可以看出,在低能见度时,三种仪器所得数据趋势基本一致,LT-31测量值出现了两

次大的跳变, VPF-730 测量值整体值偏低, 而本方案在低能见度时整体表现稳定, 波动性不大。由图 10(b)可以看出, 在中能见度时, 本方案与参考标准值的相关性比较高。样本是从高能见度到低能见度的缓慢变化过程, 三者的数据吻合较好。如图 10(b)所示, 能见度在一小段时间内出现了较大突变, 参试的三种能见度仪均作出了相应反应, 可见

本方案的能见度仪对能见度测量同样具有较好的应变表现。由图 10(c)可见, 在高能见度时, 仪器测量结果的整体相关性不如低、中能见度。因为高能见度时, 系统误差会被放大, 如光路准直性、图像采集系统与数据处理部分等都会影响测量结果。LT-31 和 VPF-730 之间也有一定程度偏差, 可见提高高能见度下的测量准确性也是亟待解决的问题。

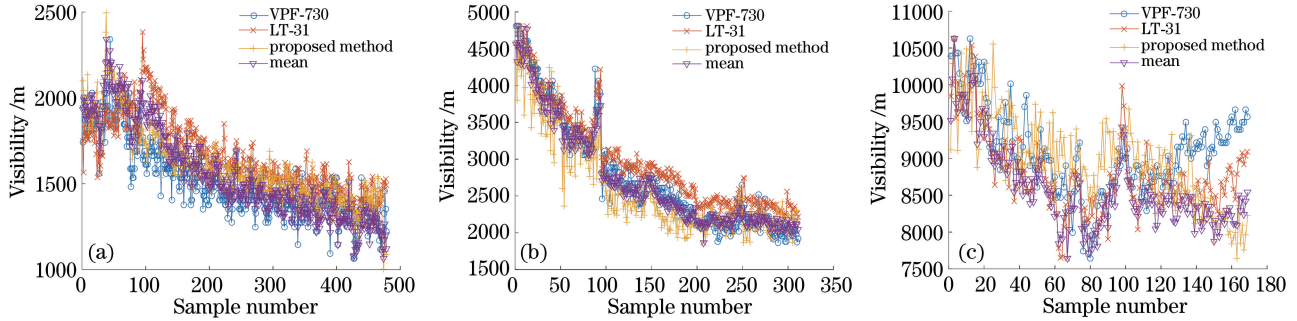


图 10 不同能见度下的数据对比。(a)低能见度;(b)中能见度;(c)高能见度

Fig. 10 Comparison of different visibility distances. (a) Low visibility; (b) medium visibility; (c) high visibility

表 1 给出了在不同能见度下测量值与参考标准值之间的 3 个评价指标。总体来讲, 随着能见度范围增大, 均方根相对偏差和相对平均偏差都有所升高, 但未超过 9.5% 和 6.6%, 符合 WMO 在气象能见度领域中对能见度仪指标的要求。

表 1 不同能见度下的评价指标

Table 1 Comparison of different visibility distances

Visibility	$\sigma_{srd}/\%$	$A_{srd}/\%$	r
Low visibility	7.5	2.4	0.94
Medium visibility	8.0	4.5	0.97
High visibility	9.5	6.6	0.77

3.3 不同天气现象下外场试验的比对分析

由于仪器所在地区在外场试验期间仅出现了降雨和雾天气, 因此本文针对试验过程中出现的这两种天气状况进行数据分析。由图 11(a)可以看出, 由于本次降水过程中的能见度较高, 大量样本值

已经超过 LT-31 的峰值 15000 m, 故而无法进行试验, 而 VPF-730 测量范围较大, 所以只将 VPF-730 与本方案进行比对分析。本次降水时间比较短, 能见度值整体呈先下降后上升的趋势, 两者之间的相关系数可达 0.95。在能见度陡降时, 两种能见度仪的测量结果大致相同, 可见本方案反演出的能见度值能适应雨天能见度的变化。

本文选择的雾天的相对湿度均在 85% 以上(最高 90%, 最低 85%), 能见度在 2000 m 以下。能见度数据与相对湿度的变化如图 11(b)所示, 各仪器在雾天的能见度测量趋势较一致。3 种仪器测量的能见度值均随着相对湿度的增大而减小, 且相对湿度达到最大时 3 种能见度仪的测量值均降到最低。本方案测量值在前半部分略低于均值, 这可能是因为相机自身在采集图像时存在散焦, 导致分光比变化不大, 测得的消光系数有偏差。表 2 给出了雨天

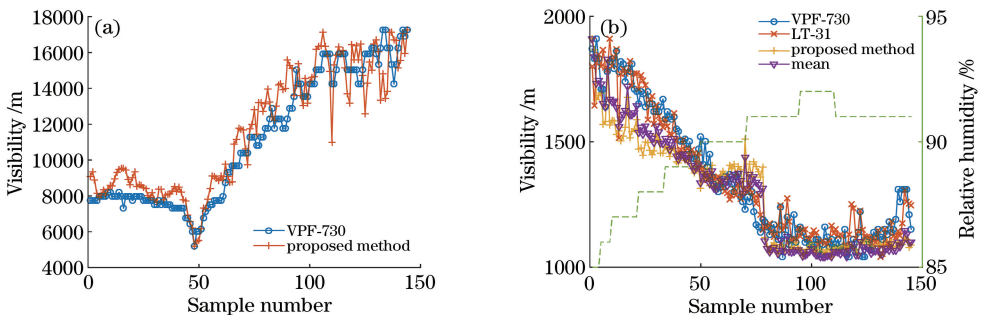


图 11 不同天气现象下的能见度对比。(a)雨天;(b)雾天

Fig. 11 Visibility comparison of different weather phenomena. (a) Rain; (b) fog

表2 不同天气现象下的评价指标

Table 2 Visibility comparison of different weather phenomena

Weather	$\sigma_{srd}/\%$	$A_{srd}/\%$	r
Rain	11.43	4.69	0.95
Fog	8.97	2.09	0.99

和雾天下3个评价指标。其中,由于雨天只进行了两种能见度仪的比对,故将VPF-730前向散射式能见度仪作为参考标准值。雨天和雾天的相关系数分别为0.95和0.99,说明两种仪器的测量值都与参考标准值的相关性高。均方根相对偏差和相对平均偏差均满足WMO对能见度测量精度的要求^[26]。雨天的相对误差较雾天而言偏大,这是因为当天的能见度较高,局地大气状况(降雨、强风等)引起能见度发生幅度较大的变化。此时消光系数的测量结果可能不具

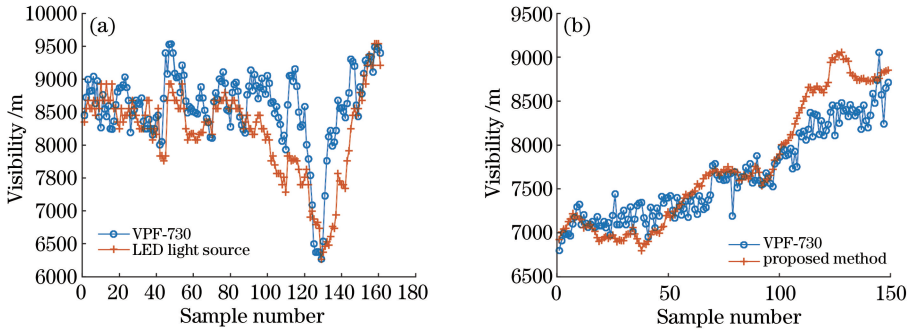


图12 不同光源下的能见度对比。(a) LED;(b)积分球

Fig. 12 Visibility comparison of different light sources. (a) LED; (b) integrating sphere

4 结 论

本文提出了一种以积分球为光源的同源双光路能见度仪测量系统,并在成都信息工程大学观测场将本方案与LT-31、VPF-730观测数据进行比对分析。室内试验证明积分球光源的均匀性优于LED光源。不同能见度和不同天气现象下的场外能见度数据的比对结果说明,本方案提出的能见度测量系统中低能见度下的反演一致性较好(高能见度还需进一步改善),在雨天和雾天也能有较好的能见度反演结果。传统能见度仪的维护成本高,且易受光学污染,而本方案从MOR定义出发,性价比高,解决了传统透射式能见度仪光学污染及光学对准的问题,但起步较晚,在各领域还未得到广泛运用。雨天和雾天是外场试验城市常见的天气现象,本文仅针对这两种天气现象进行了试验,霾、冰雹、沙尘暴等现象对能见度测量结果的影响有待后续进一步研究。受试验条件限制,无法在同一套系统上只针对

有代表性,故还需对高能见度的测量作进一步研究。

3.4 不同光源外场试验的比对分析

受试验条件限制,没有再同一时刻、利用同一套系统针对不同光源进行外场试验。本文选择了能见度为6000~10000 m的两个时间段的晴天数据,分别采用LED和积分球作为系统光源反演能见度,并以VPF-730前向散射式能见度仪的测量值作为参考标准值进行比对分析。图12(a)、(b)分别为以LED光源和积分球光源的同源双光路能见度测量系统与VPF-730的比对结果,可以看出,积分球光源反演结果与参考标准值的一致性优于LED光源。计算得到的LED光源的均方根相对偏差和相对平均偏差分别为7.17%和4.96%,而积分球光源分别为3.71%和1.06%,可以认为通过改善光源均匀性和分光系统稳定性增大了能见度反演的准确性。

不同的光源进行单一变量外场比对试验,这也是今后深入分析和研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Lü W T, Tao S C, Tan Y B, *et al.* Application of practical blackbody technique to digital photography visiometer system [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(6): 691-699.
吕伟涛, 陶善昌, 谭涌波, 等. 数字摄像能见度观测系统中实用黑体技术的应用[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(6): 691-699.
- [2] Tian L. Measuring data comparative analysis between atmospheric transmission meter and forward scatter meter in the low visibility weather [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2009, 26(3): 46-49.
田丽. 大气透射仪与前散射仪在低能见度条件下的测量数据对比分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 2009, 26(3): 46-49.
- [3] Pu J P, Hu Z G, Wei Y C, *et al.* Comparison and

- analysis of property of visibility automatic observation instruments[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2002, 22(1): 60-71.
- 濮江平, 胡宗刚, 魏阳春, 等. 能见度自动观测系统性能对比及分析[J]. *气象科学*, 2002, 22(1): 60-71.
- [4] Xing X N, Cui Y M, Zhang F G, *et al.* Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2010, 30(5): 15-20.
- 邢向楠, 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.
- [5] Wei T W, Wang C, Shangguan M J, *et al.* Effect of detector nonlinear response on visibility lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110402.
- 魏天问, 王冲, 上官明佳, 等. 探测器非线性响应对能见度激光雷达的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110402.
- [6] Kwon T M. An automatic visibility measurement system based on video cameras [R]. *Brazil: Minnesota Department of Transportation*, 1998: 1-68.
- [7] Li B, Tong S F, Zhang L, *et al.* Influence of horizontal atmospheric visibility on deep-space laser communication rate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1006003.
- 李勃, 佟首峰, 张雷, 等. 水平大气能见度对深空激光通信速率的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1006003.
- [8] Ma S Q, Xu Z F, Mao J T, *et al.* Experimental research on visibility reference standard for blackbody targets [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2014, 25(2): 129-134.
- [9] Wang J L, Liu X L, Lei M, *et al.* Research on new automatic visibility observation system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(7): 596-603.
- 王京丽, 刘旭林, 雷鸣, 等. 新型能见度自动观测系统研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(7): 596-603.
- [10] Xing X N, Qin S G, Li T, *et al.* Error analysis for visibility measuring device based on transmission method[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2016, 36(5): 36-39.
- 邢向楠, 秦少刚, 李涛, 等. 基于透射法的能见度测量装置的误差分析[J]. *计测技术*, 2016, 36(5): 36-39.
- [11] Yang F Y, Yang L, Miao C, *et al.* Segmentation of light spots for single-light-source dual-light-path transmissometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(6): 495-504.
- 杨丰羽, 杨玲, 缪璨, 等. 同源双光路能见度仪的光斑提取算法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(6): 495-504.
- [12] Xie X S, Tao S C, Zhou X J. Digital camera method for measuring meteorological visibility [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(1): 97-100.
- 谢兴生, 陶善昌, 周秀骥. 数字摄像法测量气象能见度[J]. *科学通报*, 1999, 44(1): 97-100.
- [13] Bäumer D, Versick S, Vogel B. Determination of the visibility using a digital panorama camera [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(11): 2593-2602.
- [14] Xu Z F, Yang L. Digital photography measurement of near-field laser spot illumination [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(10): 111-115.
- 徐振飞, 杨玲. 数字摄像法测量激光近场光斑照度[J]. *光电工程*, 2012, 39(10): 111-115.
- [15] Du K, Wang K, Shi P, *et al.* Quantification of atmospheric visibility with dual digital cameras during daytime and nighttime [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(8): 2121-2130.
- [16] Wang J L, Liu X L, Yang X H, *et al.* Development and evaluation of a new digital photography visiometer system for automated visibility observation [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 87: 19-25.
- [17] Du C Y, Ma S Q, Yang L, *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[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 610-617.
- [18] Tang F J, Ma S Q, Yang L, *et al.* A new visibility measurement system based on a black target and a comparative trial with visibility instruments [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 143: 229-236.
- [19] Hao Q Z, Yang L, Zhen X Q, *et al.* Design of background light elimination for visibility instrument [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030102.
- 郝勤正, 杨玲, 甄小琼, 等. 能见度仪的背景光消除设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030102.
- [20] World meteorological organization. Guide to

- meteorological instruments and methods observation [R]. 6th ed. Geneva: WMO, 1996.
- [21] Xia D, Wu Z Q, Tan H B, *et al.* Analysis and correction of visibility measured by automatic observing system in Guangdong [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(1): 68-72.
夏冬, 吴志权, 谭浩波, 等. 广东省能见度自动观测系统资料评估分析与订正 [J]. *气象科技*, 2014, 42(1): 68-72.
- [22] Jacquez J A, Kuppenheim H F. Theory of the integrating sphere [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1955, 45(6): 460-470.
- [23] Xiao S R, Li M. Design of uniform LED light source [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 600-605.
肖韶荣, 李曼. 一种 LED 照明光源均匀度设计 [J]. *应用光学*, 2015, 36(4): 600-605.
- [24] Zhan C L, Li Z Q, Liu J P, *et al.* Measurement of spectral irradiance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1245-1249.
占春连, 李正琪, 刘建平, 等. 光谱辐射照度测试研究 [J]. *光子学报*, 2009, 38(5): 1245-1249.
- [25] Lü W T, Tao S C, Liu Y F. Measuring meteorological visibility based on digital photography-differential luminance method and experimental study [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(4): 559-570.
吕伟涛, 陶善昌, 刘亦风. 基于数字摄像技术测量气象能见度-双亮度差方法和试验研究 [J]. *大气科学*, 2004, 28(4): 559-570.
- [26] Chen X T, Lu C H, Zhang Y J, *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.