

# 能见度仪的背景光消除设计

郝勤正<sup>1,2</sup>, 杨玲<sup>1,2</sup>, 甄小琼<sup>1,2\*</sup>, 刘汉明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225;

<sup>2</sup>中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225;

<sup>3</sup>赣南师范大学数学与计算机科学学院, 江西 赣州 341000

**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。通过 CCD 传感器获取的光源亮度是光斑提取算法及能见度反演模型的重要组成部分, 而背景光噪声严重影响能见度反演准确性。针对复杂背景光干扰下能见度反演出现的较大误差, 运用幅度调制方法重新设计调制光源, 并对 CCD 采集的图片进行解调, 以有效消除背景光。实验结果表明: 光源幅度调制方法能有效去除背景光, 并可消除随机噪声和相机暗电流噪声; 当调制点数范围为 32~128 时, 图像去噪效果较好, 去噪后光斑图像峰值信噪比大于 30; 在上述调制点范围内, 点数越大, 峰值信噪比越大, 则均方根误差越小。调制点数范围为 32~128 时, 所提方法能显著提高能见度反演精度。

**关键词** 大气光学; 成像与能见度; 背景光噪声去除; 光源调制; 随机噪声

中图分类号 P412.17

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030102

## Design of Background Light Elimination for Visibility Instrument

Hao Qinzheng<sup>1,2</sup>, Yang Ling<sup>1,2</sup>, Zhen Xiaoqiong<sup>1,2</sup>, Liu Hanming<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;

<sup>2</sup> CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu, Sichuan 610225, China;

<sup>3</sup> School of Mathematics and Computer Science, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

**Abstract** Homologous dual-light-path visibility instrument is a visibility instrument based on digital camera method. The brightness of the light source obtained by the CCD sensor is an important part of the spot extraction algorithm and the visibility inversion model. The background light noise seriously affects accuracy of visibility inversion. Aiming at the large error of visibility inversion under complex background light disturbance, we use the amplitude modulation method to redesign the modulated light source, and demodulate the CCD image so that the background light is eliminated effectively. The experimental results show that the light source amplitude modulation method can effectively remove the background light, the random noise, and the dark noise of the camera. When the modulation points are within 32 to 128, the image denoising effect is good and the peak signal-noise-ratio (PSNR) of the speckle image after denoising is greater than 30. In this modulation point range, the larger the number of modulation is, the larger the PSNR is and the smaller the root mean square error is. Inversion accuracy of the visibility is greatly improved in the range of the above modulation points, which means that the amplitude modulation method can significantly improve the accuracy of visibility inversion.

**Key words** atmospheric optics; imaging and visibility; background light noise elimination; light source modulation; random noise

**OCIS codes** 010.7295; 010.1100

收稿日期: 2017-08-30; 收到修改稿日期: 2017-09-26

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106047)、四川省教育厅科研项目(16ZB0211)

作者简介: 郝勤正(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气能见度方面的研究。E-mail: 327372436@qq.com

导师简介: 杨玲(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: cimyang@cuit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zhenxq@cuit.edu.cn

# 1 引言

能见度测量是气象、航空和交通等行业的重要任务之一。经过多年发展,相关的测量仪器已经日益成熟。传统能见度仪器的系统复杂度高,价格高昂,且易受光学污染,因此能见度测量以人工目测为主,而人工目测与仪器测量相比有一定的主观误差。随着 CCD 数字摄像技术的逐渐成熟,科研工作者们试图采用数字摄像法设计一款适用范围广、精度高且价格低廉的能见度测量仪器<sup>[1]</sup>。基于以上需求,同源双光路方法被运用到基于数字摄像法的能见度仪器研究中<sup>[2]</sup>。

基于世界气象组织(WMO)对能见度测量的定义<sup>[3]</sup>,同源双光路能见度仪通过测量目标光强度并将其代入能见度反演模型,从而实时生成能见度数据。在测量过程中,要求目标光源均匀性良好,且不受背景光的干扰。但实际上,目标光源的光强度极易受环境光干扰<sup>[4]</sup>,如果不去除干扰,所得的能见度反演结果会存在较大的误差。

在基于数字摄像法的能见度测量仪器去背景光噪声研究中,采用的方法主要有:双亮度差法抵消去噪和图像处理去噪。双亮度差法抵消去噪从能见度反演原理出发,Du 等<sup>[5-6]</sup>采用多光路目标物亮度差法消除了单个目标物亮度的缺陷,能较好地去除背景光等噪声,但在计算模型中假设远近目标物、背景均为同轴。戴庞达等<sup>[7-8]</sup>从图像处理方面入手,尝试在成像图片中实现背景光的滤除,但实际环境光噪声的多变性会导致去噪模型不具备普遍适应性,最终使得能见度仪出现测量误差。基于双亮度差法的理论分析,设计了一套光源调制系统,较好地提取了在复杂背景光干扰下的目标光强度。该方案可有效提高能见度仪的测量精度。

## 2 基本原理

### 2.1 能见度测量原理

能见度是重要的业务性参量,在仪器测量中通常用较为客观的气象光学距离(MOR)表示<sup>[9]</sup>。MOR 的定义为:白炽灯发出色温为 2700 K 的平行光束的光通量在大气中削弱至初始值的 5% 所经过的路径。下文中所描述的能见度及测量值均指 MOR。图 1 为同源双光路能见度仪示意图。

同源双光路能见度仪是一种基于数字摄像法的能见度仪器,由发射端和接收端组成。为弥补能见度仪器要求的较长基线,发射端实际由两块光学反

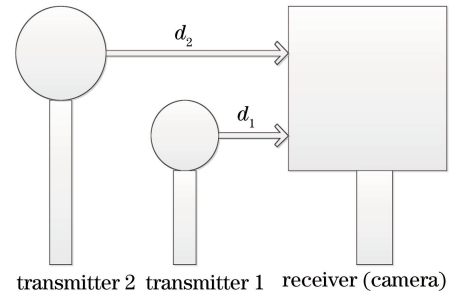


图 1 同源双光路能见度仪示意图

Fig. 1 Schematic of homologous dual-optical-path visibility instrument

光板组成,调制光源放置于接收端 CCD 相机旁, $d_1$ 、 $d_2$  为两倍基线长度(分别为 30 m 和 50 m),接收端采用工业 CCD 相机。基线长度已满足将调制光源近似为点光源的条件,按照布格朗伯(Bouguer-Lambert)定律,平行光在大气中的衰减可表示为

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

式中  $F_0$  为调制光源出射位置的初始光通量, $L$  为光在均匀大气(水平能见度测量原理中假设大气均匀)的传播距离, $\sigma$  为大气消光系数, $F$  为经过大气衰减后的光通量。CCD 相机不能直接测量光通量,但通过对实验中使用的 CCD 相机进行线性标定<sup>[10]</sup>,保证相机工作于线性区域,使拍摄到光斑的亮度与实际光通量成正比,从而得到

$$I = I_0 \exp(-\sigma d), \quad (2)$$

式中  $I_0$  为调制光源出射口的光斑亮度, $d$  为传输距离, $I$  为传输后的光斑亮度。无论距离为  $d_1$  或  $d_2$ ,对应的光斑亮度均满足(2)式,即

$$I_1 = I_0 \exp(-\sigma d_1), \quad (3)$$

$$I_2 = I_0 \exp(-\sigma d_2). \quad (4)$$

将(3)、(4)式相除,可求得消光系数为

$$\sigma = \frac{\ln(I_1/I_2)}{d_2 - d_1}. \quad (5)$$

由(5)式可知,同源双光路方法根据求出的远近光斑的亮度和传输距离,便可求得消光系数,从而得到能见度为

$$R_{\text{MOR}} = \frac{-\ln 0.05}{\sigma}. \quad (6)$$

### 2.2 光源调制原理

由第 2.1 节可知,根据 CCD 相机拍摄到的图片提取出远近目标的光斑亮度即可计算得到消光系数,从而得到能见度。但在实际仪器测量过程中,太阳光和一系列非目标背景光均会被相机采集<sup>[11]</sup>,光斑亮度被复杂背景光掩盖,从而使得能见度反演结

果产生较大误差。为有效提取目标光斑亮度,采用正弦波调制重新设计光源系统,以去除能见度反演中不需要的背景光噪声。

光源调制系统示意图如图 2 所示。由计算机

(PC)、光源调制模块及型号为 MV-VS142FM/C 的工业相机组成,用 RS232 串口线将光源调制模块与 PC 连接,用 1394 线将相机与 PC 连接,通过 PC 发出的指令触发光源调制和 CCD 图像同步采集。

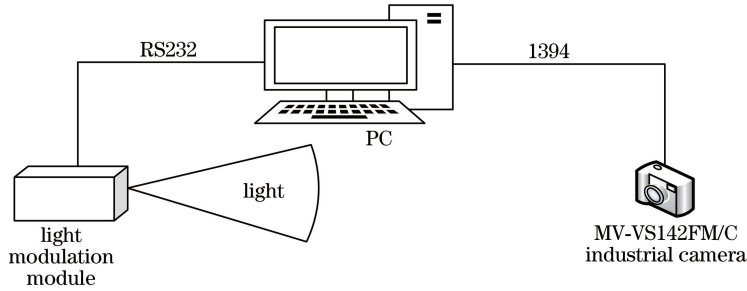


图 2 调制系统示意图

Fig. 2 Schematic of modulation system

在幅度调制中,认为目标光斑为弱信号,背景光为强信号噪声。通过单片机(MCU)控制器调制电流或电压来控制光源功率并同步采集图像,再对所得图像进行解调,提取目标光斑<sup>[12-14]</sup>。在一个完整正弦波周期内 CCD 采集  $N$  帧图像,则其中某一帧图像  $n$  在目标光斑成像的某一点  $(x, y)$  的灰度值  $G(n)$  可表示为

$$G(n) = G_b(n) + G_t(n), \quad (7)$$

式中  $G_b(n)$  为背景光、CCD 暗电流等噪声成像的灰度值,  $G_t(n)$  为目标光斑成像的灰度值。将目标光斑进行正弦波调制,则  $G_t(n)$  可表示为

$$G_t(n) = G_{g0} [1 + \xi \sin(\omega \Delta t + \Phi)], \quad (8)$$

式中  $G_{g0}$  为额定功率下采集到的图像灰度值;  $\xi$  为调制幅度;  $\Phi$  为调制相位;  $\omega$  为调制角频率;  $\Delta t$  为相邻采样点的时间差,即相隔两幅图像的采集时差。

通过一个周期的光源调制,获得相应调制后的成像图片,对图片进行解调处理可以得到目标光源在 CCD 相机的成像灰度值  $G(n)$  为

$$G(n) = \{G_b(n) + G_{g0} [1 + \xi \sin(\omega \Delta t + \Phi)]\} \times \sin(\omega n \Delta t). \quad (9)$$

将(9)式展开,可得

$$G(n) = [G_b(n) + G_{g0}] \sin(\omega n \Delta t) + \frac{1}{2} G_{g0} \xi \cos \Phi + \frac{1}{2} \xi G_{g0} \cos(2\omega n \Delta t + \Phi).$$

在一个调制周期内对  $G(n)$  进行积分,由其离散特性可得调制后灰度值  $G$  为

$$G = \sum_{n=1}^N G(n) = \frac{N}{2} G_{g0} \xi \cos \Phi. \quad (10)$$

通过上述过程,即可实现对目标光斑的提取,且积分变化后背景光等噪声被完全滤除。光斑的灰度

值仅与调制信号的相位和调制幅度有关。叠加能减小相机暗电流和一些外界随机信号的噪声干扰,提高图像信噪比,从而提高能见度仪的反演精度。

## 3 实验及结果讨论

### 3.1 系统设计与标定实验

调制硬件原理如图 3 所示。系统硬件主要由自带模数转换器的单片机 U3、功率放大器 UA、平面功率发光二极管 LD 和电流检测电阻 R 组成,其中 U3 的模数转换器可使用电流调制模式。对于实际的元器件,UA 的输入与输出之间不可能完全呈线性关系,同样,LD 的电流与发光强度之间也不可能完全呈线性关系。基于这个事实,若电路简单地采用由单片机 P0.1 输出的正弦信号调制 LD 的光强,那么实现 LD 光强正弦变化的可能性几乎为零。因此,设计中使单片机 P0.1 输出为从零到最大的线性信号,同时单片机通过 P1.7 监测通过 R 的电流(实际测量的是 R 两端的电压, R 已知,因此容易获得电流值),一旦电流达到规定值,则 P0.1 输出停止变化,再通过 RS232 通信线路同步通知上位机,控制工业相机采集一张图片。这样,只要保证通过 R 的电流呈正弦变化,即可消除 UA 的非线性影响。至于 LD 的非线性影响,则通过对 LD 进行标定来校正。由于单片机无法产生连续的正弦波信号,因此相位  $\Phi$  的最小分度有限,按照正弦值表最小分度  $2\pi/1024$  设计。采样点数  $n$  的选取标准:正弦值表要保证  $1024/n$  为整数,因此要满足  $n=2^i$  ( $i=0, 1, 2, \dots$ )。考虑到正弦波调制过程中,光源信号并非从最暗到最亮整个区域呈理想线性,并且光源亮度过低会导致 CCD 无法获得足够的光照强度,因此调制有效值可定义为

$$A = \alpha A_{\max} (\alpha < 1 \text{ and } \alpha \neq 0), \quad (11)$$

式中  $A_{\max}$  为系统测量值。在进行光源调制前, 应对调制模块进行标定, 采用电流调制方式记录电流值信息, 并用光功率计记录对应的光功率值, 得到标定方程为

$$p(x) = p_1 x + p_2, \quad (12)$$

式中  $x$  为测得的光功率值,  $p_1, p_2$  为线性拟合系数。根据(12)式可以对系统进行标定, 以便恢复系统因温度升高而发生的调制偏移。标定曲线即为电流-功率曲线, 在本系统中, 电流用额定功率下  $G_{g0}$  代替, 是一无量纲。因此, 电流-功率曲线等价于灰度-功率曲线, 如图 4 所示。

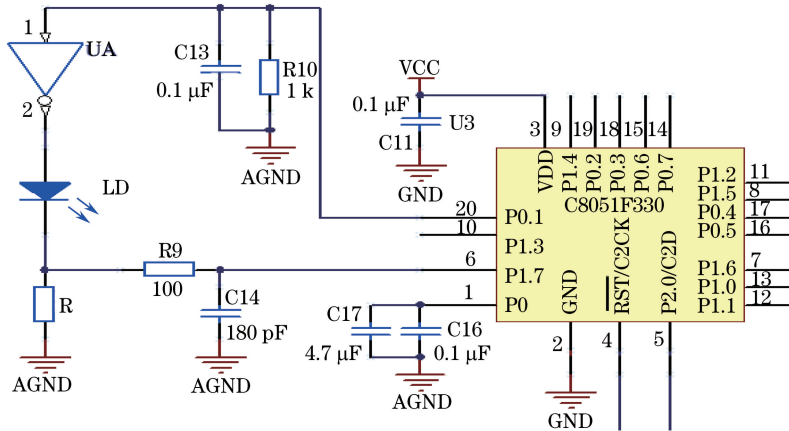


图 3 调制硬件原理图

Fig. 3 Schematic of modulation hardware

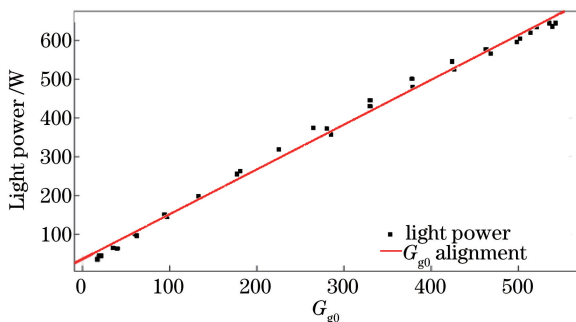


图 4 灰度-功率标定曲线

Fig. 4 Gray value-power calibration curve

研究发现, 在校准过程中, 采样点数越多, 线性度越好。因此将采样点数设置在 32~128 范围内, 这样可以避免调制光源亮度过低导致相机常工作于非线性区域。

### 3.2 光源调制实验

实验平台为搭载光源调制系统的同源双光路能见度仪。其中光源波长为 650 nm, LED 的功率为 7 W, CCD 为 MV-VS142FM/C 工业相机, 最高分辨率为 1392 pixel × 1040 pixel, 最高采集速度为 15 frame · s<sup>-1</sup>。远近反光板与调制光源的距离分别为 30 m 和 15 m。参考平台选取相同实验地点的一台 Vaisala LT31 透射式能见度仪, 其拥有较高的测量精度, 最大量程为 15000 m。实验于 2017 年 5 月进行, LT31 透射式能见度仪每隔 1 min 采集一次数

据, 实验前 30 s 进行光源调制, 后 30 s 保持额定功率, 便可在 1 min 内获得去背景和不去背景的两组数据, 将两组数据的平均值作为当前 1 min 的能见度数据。此外, 实验涉及不同采样点数的光源调制, 因此不同点数的采样实验需要保证时间和能见度条件接近, 避免其他干扰因素影响实验结果, 并保证采样样本数相同。

设置光源调制的相应参数, 完成正弦波调制实验。将仪器拍摄到的不同调制点数光斑去背景后与额定功率拍摄到的光斑进行质量评价, 选定不同能见度范围 (小于或等于 15000 m) 的实验数据与 LT31 透射式能见度仪数据进行比较, 以完成误差评价。

图 5 为完整的去噪声能见度反演流程图。按照上位机软件设定的正弦信号进行调制, 同时触发 CCD 相机对相应的采样点进行拍照 (相机触发信号设定 2 ms 延时, 以保证采样点达到所设定的采样强度)。对所采集图像进行判断, 如果采样达到一个周期, 则将这一个周期采样得到的图像用乘法器与对应的正弦信号进行解调, 当解调、归一化和叠加完成后, 即可得到去除背景噪声的图像, 提取光斑后将其代入能见度反演公式即可求得当前能见度。

图 6 和图 7 分别为额定功率和正弦波调制 (32 调制点) 去噪成像结果。通过对比可见, 反光板以外

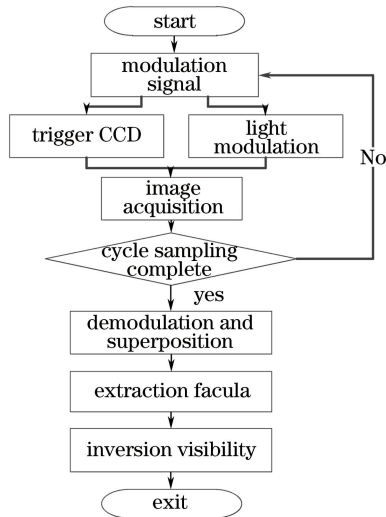


图5 去噪声能见度反演流程图

Fig. 5 Flow chart of denoising visibility inversion

的噪声被完全滤除。由于 CCD 位深为 12 bit, 因此应当使成像在保证目标光斑不出现过饱和的条件下尽可能亮, 以保证相机工作在线性区域。叠加后分别进行多天的白天和夜晚实验, 将去背景光后的灰度图与额定功率(未去背景光)灰度图进行对比。为客观地衡量调制前后的图像是否去除了背景噪声, 使用均方误差(MSE)及峰值信噪比(PSNR)两个参数表示不同调制点数下图像的去噪效果<sup>[15-16]</sup>。将额定功率所采集的图像定义为  $I$ , 经去噪后的图像定义为  $J$ ,  $I$  和  $J$  的大小均为  $m \times n$ , 则均方误差可表示为

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i, j) - J(i, j) \|^2. \quad (13)$$

PSNR 可用于衡量经过调制后图像去背景噪声的效果, 即去噪图像与额定功率成像的均方误差相对于 12 bit 数据最大灰度值的对数, PSNR 可表示为

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \lg(X_{\text{max}}^2 / E_{\text{MSE}}) = 20 \lg(X_{\text{max}} / E_{\text{MSE}}), \quad (14)$$

表1 质量评价结果

Table 1 Results of quality assessment

Modulation method	$R_{\text{PSNR}} / \text{dB}$		$E_{\text{MSE}} / \text{m}$	
	Day time	Night time	Day time	Night time
Sine wave with 16 points	34.0706	35.4971	25.4693	18.3389
Sine wave with 32 points	35.3293	36.1516	19.0614	15.7732
Sine wave with 64 points	37.1116	38.4386	12.6451	9.3159
Sine wave with 128 points	39.6679	39.5960	7.0193	7.1364

式中  $X_{\text{max}}$  为成像灰度的最大值, 峰值信噪比的单位为 dB。选取白天和夜间部分数据(每一组各采样 3600 个样本), 根据同一时间的样本计算两者的 MSE 与 PSNR。表 1 为质量评价结果, 给出了白天和夜间多组实验得到的图片质量评价参数 MSE 和 PSNR 的平均值。



图6 额定功率成像结果

Fig. 6 Imaging result of rated power



图7 去背景光成像结果(32 调制点)

Fig. 7 Imaging result after eliminating background (32 modulation points)

表 1 给出不同调制点数下白天和夜间去背景光噪声前后目标光斑的质量评价结果, 原则上 MSE 越小, PSNR 越大, 则去除背景光噪声的效果越好。白天受太阳光等背景光噪声干扰, 去噪声后峰值信噪比高于夜间。而由于相机自身的暗电流及随机光源噪声的影响, 解调后叠加会去除部分野值, 从而抵消野值等噪声对成像质量造成的影响。在对成像进行质量评价后, 使用不同调制点数的去背景图提取光斑, 再将其代入能见度反演公式, 以得到能见度。

### 3.3 能见度反演结果与分析

能见度仪是一套复杂的系统,反演能见度值不仅与仪器的精度和可靠性有关,也会受到如雨、雪等大气环境的影响,产生反演误差。为直观地体现光源调制的去噪效果,将去噪前后的能见度反演值与 LT31 标准数据进行对比,画出反演值与标准值曲线。在标定实验过程中,调制点数应满足  $n=2^i (i=0,1,2,\dots)$ ,且调制点数不超过 128 点。选择 64 点正弦波调制,并对其进行解调去噪处理,将去噪后的图像代入能见度反演公式,计算能见度;再选择同一时间段额定功率下的成像求得未经调制处理的能见度,以进行对比。

图 8 和图 9 分别为高能能见度白天样本对比图和夜间样本对比图。将采用正弦波调制去噪和额定功率下的反演能见度值与 LT31 标准数据进行对比,考虑到 LT31 超过 15000 m 量程时可能出现反演误差,为尽可能保证连续采样、能见度变化趋势稳定,并保证对比数据准确,确定的样本数为 120 个。由图 8 可见,白天若不进行调制,反演值相对于标准数据出现较大偏差,反演曲线与标准能见度曲线出现较多不一致;而经光源调制处理后的能见度反演值与标准值趋势一致,因背景光造成的反演误差显著减小。由图 9 可见,夜间样本调制与否,所得结果都与 LT31 标准数据较为接近,但可以明显看出经过去除背景光噪声处理后的能见度值与标准能见度值偏差程度要小,因此认为在较高能见度条件下,对于上述样本,去除背景光噪声后能在一定程度上提高仪器的反演精度。在保持样本数一致的情况下,选取中低能见度样本与同一时刻的 LT31 能见度值进行对比。

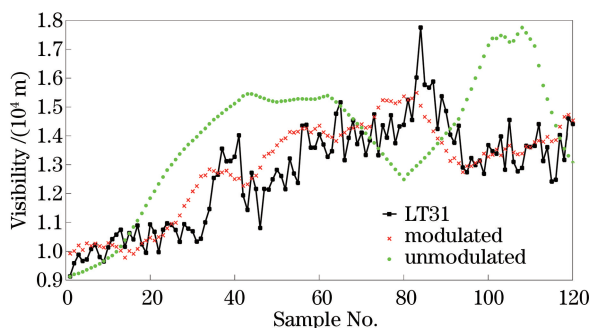


图 8 高能能见度白天样本对比图

Fig. 8 High visibility contrast chart in daytime

图 10 和图 11 分别为中低能见度白天样本对比图和夜间样本对比图。由图可以明显看出,无论白天还是夜晚,经过调制去噪处理后反演样本与标准能见度趋势一致,且离散程度较未经调制处理的反演结果

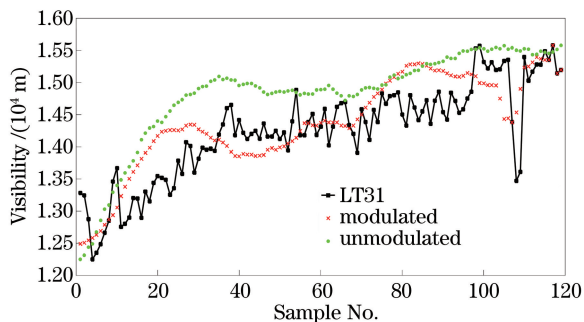


图 9 高能能见度夜间样本对比图

Fig. 9 High visibility contrast chart in nighttime  
更小。在中低能见度条件下,太阳光、路灯等噪声光是引入能见度仪反演误差的主要因素;而在较高能见度条件下,由分光比等因素造成的反演误差被放大,但经调制去噪处理后的反演结果与标准能见度仍具有一致性,且离散程度较未经调制去噪处理的反演结果更小。因此认为在不同能见度条件下,经过本系统去噪处理后,仪器的反演精度得到显著提高。

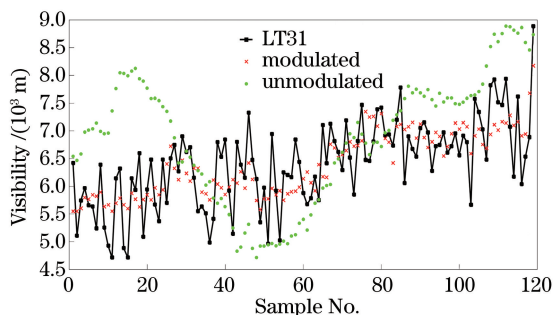


图 10 中低能见度白天样本对比图

Fig. 10 Low and medium visibility contrast chart in daytime

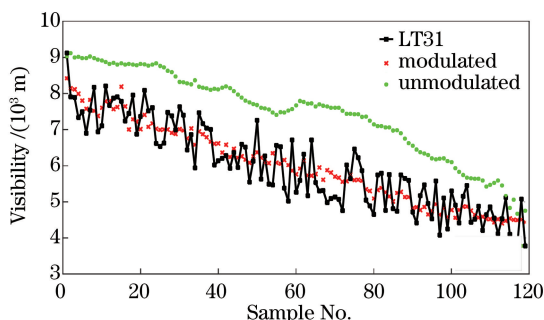


图 11 中低能见度夜间样本对比图

Fig. 11 Low and medium visibility contrast chart in nighttime  
将采用本设计去噪前后采集样本的能见度反演值与 LT31 标准数据进行对比,采用均方根误差(RMSE)评价同源双光路能见度仪数据与 LT31 标准数据的离散程度,则 RMSE 可表示为

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - W_i)^2}, \quad (15)$$

式中  $N$  为样本个数,  $Y_i$  为标准能见度,  $W_i$  为同一

时间能见度仪的反演值。所有能见度值均为分钟能见度值,全部样本数为 22800,计算采用的有效样本数为 18000。按照气象预报划分时间,8:00—20:00 为白天,20:00 到次日 8:00 为夜晚。将不同调制点能见度反演数据代入(15)式进行计算,得到均方根误差。RMSE 值越小,则反演仪器精度越高。同时用相关系数  $R$  评价同源双光路能见度仪与 LT31 件的线性相关程度, $R$  接近 1 说明线性相关程度高<sup>[17-18]</sup>,相关系数计算方程为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})(W_i - \bar{W})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2}}, \quad (16)$$

式中  $\bar{Y}$  与  $\bar{W}$  分别为 LT31 能见度样本均值和反演

均值。

表 2 为同源双光路与 LT31 数据对比。由表 2 可以看出,未经调制时能见度反演结果出现较大误差,提高仪器精度的过程中需要去除背景光噪声;正弦波调制下反演能见度误差均有所减小,白天的去噪效果更好,在此方法调制下可去除夜间随机光源噪声干扰及相机暗电流噪声;正弦波调制方法的去噪效果较稳定,在超过 128 个调制点后此方法效率较低,因此不能为了提高精度而无限增加采样点。考虑到外界环境的多变性,在多云天气下,应采用超过 32 点正弦波调制以避免云对太阳光的短暂遮挡引起的误差;在晴朗天气下,则采用低于 32 点正弦波调制来提高系统效率。

表 2 同源双光路与 LT31 数据对比

Table 2 Comparison between homologous double light path and LT31 data

Modulation method	$E_{\text{RMS}} / \text{m}$		$R$	
	Day time	Night time	Day time	Night time
Raw (not modulated)	5860.9	1912.7	0.36	0.71
Sine wave with 16 points	978.6	802.1	0.88	0.85
Sine wave with 32 points	855.7	725.6	0.89	0.91
Sine wave with 64 points	835.3	692.5	0.91	0.95
Sine wave with 128 points	512.4	629.7	0.95	0.96

## 4 结 论

提出采用光源调制去除背景光噪声的方法,利用现有的同源双光路能见度仪进行观测实验,实验证明正弦波调制方法有较好的去噪效果,对白天能见度反演精度的提升有明显的效果。合理设计光源后,可提升能见度仪的精度。这种调制方法需要多平台同时采用不同点数测量,以改善不同场景下能见度的反演。下一步将建立多平台同时采集数据,进行能见度反演结果对比,并完成不同方法和本文方法下能见度反演结果的实时监测。

### 参 考 文 献

- [1] Legal T, Legal L, Lehn W. Measuring visibility using digital remote video cameras [J]. American Meteorological Society, 1994, 9: 87-89.
- [2] Lü W T, Tao S C, Liu Y F, *et al.* Measuring meteorological visibility based on digital photography-dual 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,等.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.

- [3] Jarraud M. Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8) [M]. Switzerland: World Meteorological Organisation, 2008.
- [4] Lü W T, Tao S C, Tan Y B. Error analyses of daytime meteorological visibility measurement using dual differential luminance algorithm [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(5): 619-628.  
吕伟涛,陶善昌,谭涌波.双亮度差方法测量白天气象能见度时的误差分析[J].应用气象学报,2005,16(5): 619-628.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Dai P D, Zhang Y J, Lu C H, *et al.* Research on night visibility inversion algorithm based on the dual light sources image and curve evolution theory [J].

- Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2351-2354.
- 戴庞达, 张玉钧, 鲁昌华, 等. 基于曲线演化的双光源夜间能见度反演算法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2351-2354.
- [8] Li Y J, Zhang Y J, Zhou Y, *et al.* Image processing in nighttime visibility meter based on watershed segmentation algorithm[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(2): 131-138.
- 李勇军, 张玉钧, 周毅, 等. 基于分水岭分割算法夜间能见度仪的图像处理研究方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(2): 131-138.
- [9] Sun X J. Atmospheric observation [M]. Beijing: Meteorological Press, 2009.
- 孙学金. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [10] Ma S Q, Xu Z F, Mao J T, *et al.* Experimental research on visibility reference standard for blackbody targets[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(2): 129-134.
- 马舒庆, 徐振飞, 毛节泰, 等. 以黑体为目标的能见度参考标准试验研究[J]. 应用气象学报, 2014, 25(2): 129-134.
- [11] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [12] Wu K Q, Yu X C, Wu F H, *et al.* Application of laser lock-in imaging in rail wear measurement [J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 353-356.
- 吴柯庆, 余学才, 吴福华, 等. 激光锁定成像在钢轨磨损测量系统中的应用[J]. 激光技术, 2012, 36(3): 353-356.
- [13] Su K. Application of laser locked imaging technology in complex industrial environment [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- 苏柯. 激光锁定成像技术在复杂工业环境检测中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [14] Wu K Q. Study on some problems in train sight measurement system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- 吴柯庆. 火车导轨磨损机器视觉测量系统中的若干问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [15] Yu L Q, Qin Y L, Zhang X S. Denoising of strong noisy image via gradient reweighted non-local averaging over learned dictionaries [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111002.
- 余临倩, 覃亚丽, 张晓帅. 基于字典学习的梯度重权非局部平均的强噪声图像去噪[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111002.
- [16] Wang L, Ma Y P, Yao B, *et al.* Compressed imaging experiments based on gradient projection algorithm reconstruction and image quality assessment [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121101.
- 汪磊, 马彦鹏, 姚波, 等. 基于梯度投影算法重构的压缩成像实验及质量评价[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121101.
- [17] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, *et al.* Near forward light scattering characteristics of airborne particles [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0529001.
- 吴金雷, 张金碧, 张莉, 等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0529001.
- [18] Tang F, 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.