

光电探测器反向偏置电压对能见度测量不确定度的影响

肖韶荣^{1,2} 石刘峰¹ 黄彪¹

¹南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

²江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044

摘要 为了研究光电探测器反向偏置电压对能见度测量的影响,使用光电探测器检测稳定的脉冲光束,改变光电探测器的反向偏置电压,通过精密示波器观察光电探测器输出信号的波形并读取输出信号的响应时间,用真有效值电压表测量相应波形有效值。结果表明,反向偏置电压的漂移会引起光电探测器响应时间的变化,进而影响光电探测器输出信号的有效值,给能见度测量带来不确定性。在选择光电探测器时要考虑反向偏压的影响,并保持反向偏压稳定。

关键词 测量;能见度;光电探测器;反向偏置电压;响应时间;输出电压有效值

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071206

Effect of Photodetector Reverse Bias Voltage on Visibility Measurement Uncertainty

Xiao Shaorong^{1,2} Shi Liufeng¹ Huang Biao¹

¹*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu, Nanjing 210044, China*

²*Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu, Nanjing 210044, China*

Abstract In order to study the effect of photodetector reverse bias voltage on visibility measurement, a photodetector was used to detect the stable pulse beam, the reverse bias voltage of the photodetector was changed, and the response time and root mean square (RMS) of the output signal were read with the oscilloscope observing photodetector output signal waveform. The results show that the drift of the reverse bias voltage causes the photodetector response time changing, and RMS of the photodetector output signal is affected. The drift can affect the uncertainty of visibility measurement. When choosing photodetector in the designing of visibility meter, the influence of the reverse bias voltage should be considered, and the reverse bias voltage must be stable.

Key words measurement; visibility; photodetector; reverse bias voltage; response time; RMS of output voltage

OCIS codes 120.1880; 230.0040

1 引言

自从柯西米德(Koschmieder)建立了能见度理论以后,人们开始采用仪器测量能见度^[1],目前商用能见度仪都是借助测量透射率或散射系数的光学仪器,主要有透射式能见度仪和前向散射式能见度仪两种类型^[2-4],数字摄像^[5]和激光雷达测量大气水平能见度^[6]仍未进入实用阶段。近年,由于激光通信、高速公路交通安全和环境监测日益受到重视,对能见度测量仪的需求迅速增加^[7-9],并且对能见度仪的性能参数提出了新的要求。譬如,为了适应安装和供电条件,要求能见度仪采用太阳能电池供电、仪器自身耗电量要低和长期可靠性好等。为了满足这些新要求,电路系统的设计尽可能选择低功耗电子器件,采用低电压供电。

针对高速公路安全预警需要,作者所在课题组设计了一种低功耗的能见度测试仪,系统设计采用模块

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-03-05; 网络出版日期: 2015-06-19

基金项目: 公益性(气象)行业专项(GYHY201203067)、江苏省科技支撑计划(BE2010733)

作者简介: 肖韶荣(1958—),男,博士,教授,主要从事激光技术应用和光电系统信号处理的技术方面的研究。

E-mail: sr.xiao@163.com

方式,系统电路工作电压为3.3 V,这是目前商用低功耗微电子器件主流工作电压。在设计的系统中,选用探测面积大的光电二极管作为接收探测器,考虑到高能见度时探测器接收的光功率大、低能见度时探测器接收的光功率小,而光电二极管处于零偏置状态时线性动态范围小,只能检测微弱光信号^[10],因此使光电二极管处于反向偏置状态。在按模块进行性能测试统调过程中,观察到光电二极管的反向偏置电压对前置放大器输出信号产生一定的影响。为了解反向偏置电压对能见度测量不确定度的影响,本文以透射式能见度仪为例进行了实验研究,所得结果对低功耗能见度仪的设计具有参考价值。

2 透射式能见度测量仪及误差来源

图1是自行设计的透射式能见度测量仪的结构框图,它由光源控制器、光发射器、光接收器和信号处理与采集等部分组成。光接收器包括光电探测器、前置放大器,信号处理与采集包括中间放大器、滤波器、有效值转换电路、A/D采样和单片机等。光发射器发出一束近乎平行的功率为 P_0 的稳定光束,传输一定距离 L 后到达光接收器,经过大气衰减后光功率变为 P_1 ,光接收器的光电探测器将接收到的光信号转换为电信号,再经过前置放大、滤波和有效值转换等信号调理后,获得的电压信号与光电探测器接收到的光功率 P_1 成正比。

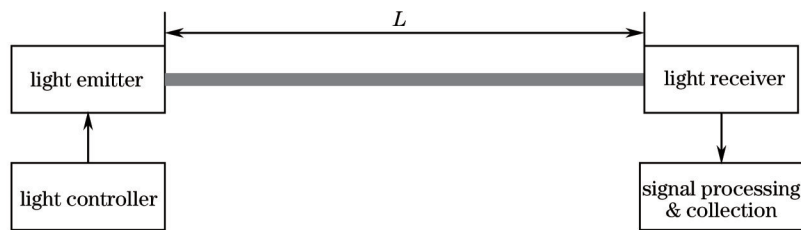


图1 透射式能见度仪原理框图

Fig.1 Diagram of transmission type visibility meter

传输距离 L 称为测量基线。在确定的基线下,由光接收器检测到的光功率 P_1 ,根据Bouguer-Lambert定律可获得大气消光系数 β :

$$\beta = \frac{1}{L} \ln(P_0/P_1) = \frac{1}{L} (\ln P_0 - \ln P_1) . \quad (1)$$

由柯西米德定律,取视觉阈值 $\varepsilon=0.02$ 时,气象能见度 R 为^[11]:

$$R = \frac{-\ln 0.02}{\beta} = \frac{3.912}{\beta} . \quad (2)$$

由(1)式,大气消光系数 β 的误差为:

$$\Delta\beta = \frac{1}{L} \left(\frac{\Delta P_0}{P_0} - \frac{\Delta P_1}{P_1} \right) - \frac{\Delta L}{L^2} (\ln P_0 - \ln P_1) . \quad (3)$$

一般情况下,基线长度取为70 m,在条件受到限制时取为30 m,而透射式能见度仪的光发射器和光接收器均牢固地安装在刚性足够强的金属立柱上,立柱底部紧固在用混凝土浇注的底座上,以避免地面位移造成准直性偏离^[1]。所以,基线变化极小,(3)式中的基线自身误差可以忽略不计。另一方面,由(3)式还可以看出,选用线性动态范围大的光电探测器,可以增大发射光束的功率 P_0 ,从而可以减小测量误差。在本设计中,同时对光源采取稳功率和恒温控制,发射光功率漂移很小,光源在24 h内,发射光功率的标准偏差与光功率平均值的相对不确定度约为0.05%,因此,可以认为消光系数测量误差主要来自于光接收器检测的光功率误差,(3)式可改写为:

$$\Delta\beta \approx -\frac{1}{L} \frac{\Delta P_1}{P_1} . \quad (4)$$

由(2)、(4)式,能见度测量相对误差可近似表示为:

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta\beta}{\beta} \approx \frac{1}{\beta L} \frac{\Delta P_1}{P_1} . \quad (5)$$

在光电探测器响应的线性动态范围内,能见度测量的相对误差可以用光接收端采集到的输出电压 U_1 及其误差 ΔU_1 表示,(5)式可改写为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{1}{\beta L} \frac{\Delta U_1}{U_1} \quad (6)$$

(6)式表明,在确定的测量基线下,对某一天气状态,透射式能见度仪的测量相对误差与光接收器端检测到的光电信号输出电压相对误差成正比。因此,从光接收端的光电探测器到A/D转换,信号调节电路每一环节的误差都对能见度测量误差有贡献。

能见度仪中引起光功率测量误差的原因有多种,世界气象组织(WMO)曾对透射式能见度仪测量的误差来源进行调查分析^[1],其中与系统设计有关的主要方面为光源老化和中心位置不正确、系统电子设备的不稳定性、信号传输通道干扰、环境光干扰等。针对这些因素,在本系统中采用LD光源,并进行了温度和功率恒定控制,信号滤波电路中的电阻和电容选用低温漂的元件;信号传输采用数字信号方式,抑制了信道干扰。

考虑到能见度仪是在户外使用,存在环境光的干扰,如日落日出、漂浮云层的阴影等。为了抑制环境光干扰,必须将光发射器发出的探测光束进行调制^[12],使探测光束成为一定频率的光脉冲序列,在光接收器中对探测器输出的光电信号作解调处理,从而滤除光路中环境光变化的影响。通常情况下,环境光的变化比较缓慢,为10 Hz量级的低频信号,光源调制频率一般设定为1.0~4.0 kHz^[12]。考虑到大多数精密低功耗运算放大器的增益带宽积较小,在设计中设定探测光束的调制频率为1.0 kHz。为充分利用光能量,选用光敏面积为5.8 mm×5.8 mm的2CU**型光电二极管实现光电探测;以INA122运算放大器构成电流-电压转换前置放大器,光电二极管处于反向偏置状态;用MSP430F147低功耗单片机为核心构成系统信号处理与采集电路,光接收器端的电源电压取为3.3 V。

由于使用了脉冲调制光束工作方式,所以信号检测与调节电路各环节的时间响应特性的不稳定性都将一定程度上引起输出电压信号波形的不稳定,这种波形的不稳定性会导致一定的电压有效值误差。在系统调试中应该对各个环节的时间响应特性进行测量评估,以便有针对性地采取减小误差的措施。在系统调试中首先对光电二极管进行了测试,这里仅考虑反向偏置电压变化对光电二极管响应特性的影响。

3 反向偏置电压变化对光电探测器响应时间的影响

为了研究反向偏置电压变化对光电二极管响应时间特性的影响,构造了图2所示实验装置。该装置主要由光源驱动器、激光管、标准光功率计、光电探测器、示波器、有效值电压表等组成。光源驱动器将发射光束调制成为1.0 kHz的光脉冲序列,标准功率计用来监测发射光束光强的稳定性,衰减片的作用是使光电探测器以及标准光功率计工作在线性范围内。

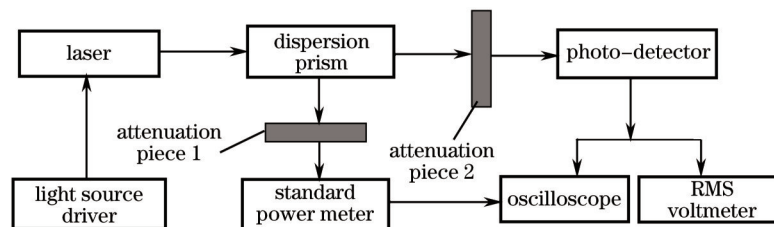


图2 实验装置原理框图

Fig.2 Block diagram of measurement system

实验中,光电二极管输出电流信号经电流/电压转换前置放大器,转换为输出电压信号。实验测量的光电探测器仍为2CU**型光电二极管,保持光电二极管的位置不变,调节分压电阻改变光电二极管两端的反向偏置电压 U_b ,从0 V增加到5 V,每改变0.1 V,用TEK数字荧光示波器(DPO4034B)读取一次波形和输出电压的响应时间 τ ,该示波器具有响应时间测量功能;同时用JG2224(DA30)真有效值视频数字毫伏表测量电压波形的有效值 U 。不同偏置电压下的输出波形如图3所示,测量得响应时间 τ 与反向偏置电压 U_b 的关系曲线如图4所示,电压有效值 U 随偏置电压的变化关系如图5所示。

由图3可以看出,前置放大器输出脉冲波形的形态随反向偏置电压变化,当光电二极管反向偏置电压为0.5 V时,输出波形上升沿和下降沿的时间都很短,整个波形与光源驱动器的调制信号波形近似;反向偏压幅度增加到2.0 V时,光电二极管输出波形上升时间明显延长,下降沿也有一定延长,继续增加反向偏置电压,波形上升沿下降沿的延迟继续增加,且波形顶部出现一定程度的倾斜。在示波器上还观察到,当所加反向偏置电

压幅度达到 4.2 V, 直到 5.0 V, 输出波形的形态变化达到最大, 保持基本不变, 但此时波形顶部明显出现倾斜。

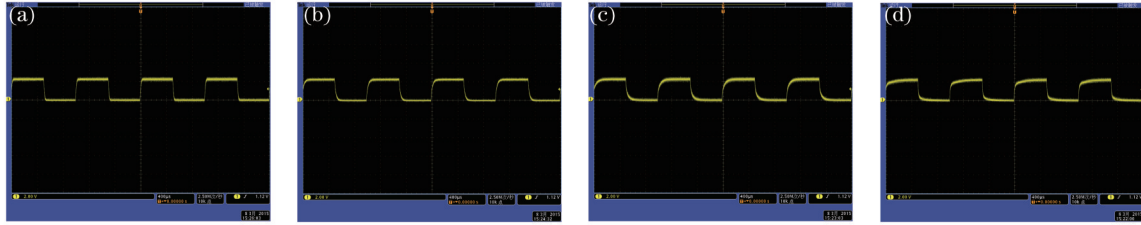


图3 不同反向偏置电压下的输出波形。(a) 0.5 V; (b) 2.0 V; (c) 3.5 V; (d) 5.0 V

Fig.3 Waveform under different reverse bias voltages. (a) 0.5 V; (b) 2.0 V; (c) 3.5 V; (d) 5.0 V

图4表明, 光电二极管光响应时间随反向偏置电压的增大而增大。从 0 V 到 4.0 V, 响应时间 τ 呈近似线性的趋势增加, 反向偏置电压增加到约 4.2 V 之后, 响应时间 τ 趋于稳定。这与示波器观察到的波形变化趋势一致。

通常认为光电二极管的响应时间主要由 4 个因素决定: 1) PN 结区内产生的光生载流子以漂移运动的方式渡越结区的时间, 称为漂移时间 τ_{dr} ; 2) PN 区产生的光生载流子由于密度分布的变化会扩散到结区内产生电流, 称这段时间为扩散时间 τ_p ; 3) 由结电容 C_j 和管内电阻 R_i 及负载电阻 R_L 构成的电路时间常数 τ_{RC} ; 4) 光电二极管耗尽区外无电场区域中激发的电子、空穴会以扩散的形式向中心有电场的区域移动, 形成横向扩散电流^[13], 横向电流会造成响应时间的延迟, 横向扩散的时间记为 τ_{hp} 。光电二极管总的响应时间为:

$$\tau = \tau_{dr} + \tau_p + \tau_{RC} + \tau_{hp} \quad (7)$$

漂移时间与耗尽层的总宽度 W 成正比, 与载流子的漂移速度成反比。由于耗尽区为高电场区域, 载流子的速度很快饱和, 因此载流子的漂移速度可以用一个固定的饱和速度 v_{sat} 估计^[14]。增加反向偏压会提高内建电场的强度, 扩展 PN 结的耗尽区宽度, 会延长漂移时间 τ_{dr} , 此外增加反向偏压也会加大结电容, 使时间常数增大^[10]。

从图5可以看出, 光电二极管前置放大器的输出电压有效值整体上随光电二极管反向偏压增加而减小。在 2.5~4.0 V 反向偏压区间, 呈良好的线性减小趋势; 从 4.2 V 开始趋于稳定, 4.3~5.0 V 区间内, 基本保持不变。输出电压有效值随反向偏压变化的规律总体上和波形及响应时间随反向偏压变化规律是紧密相关的。

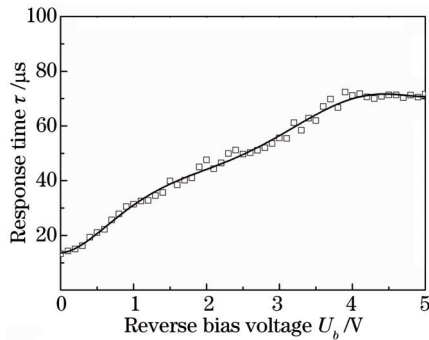


图4 响应时间与反向偏置电压的关系

Fig.4 Relation curve between response time and reverse bias voltage

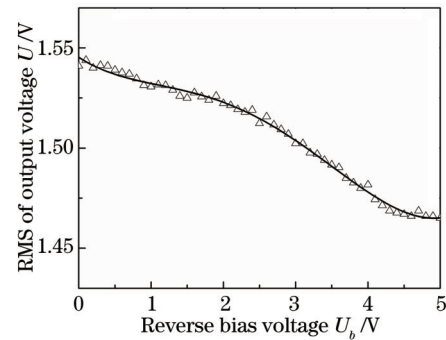


图5 输出电压有效值与反向偏置电压的关系

Fig.5 Relation curve between output voltage RMS and reverse bias voltage

4 反向偏压漂移对能见度测量误差的影响

为分析光电二极管反向偏压对能见度测量误差的影响, 不妨以光电二极管前置放大器输出电压的有效值表达接收到的光功率, 即此电压有效值的测量不确定性将产生能见度测量的不确定性。

根据图5中的测试值, 利用 MATLAB 拟合得到输出电压有效值 U 随反向偏压 U_b 的变化关系曲线方程如下:

$$U \approx 1.5452 - 0.0225U_b + 0.015U_b^2 - 0.006U_b^3 + 0.0006426U_b^4, \quad (8)$$

对(8)式求差分得到反向偏压漂移引起的输出电压有效值变化为

$$\Delta U \approx U^4(U_b)\Delta U_b \approx (-0.0225 + 0.030U_b - 0.018U_b^2 + 0.0025704U_b^3)\Delta U_b. \quad (9)$$

在光电二极管的线性动态范围内,检测到的光功率正比于前置放大器的输出电压。因此,可用输出电压的相对误差表达检测到的光功率相对误差:

$$\frac{\Delta P_1}{P_1} = \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{(-0.0225 + 0.030U_b - 0.018U_b^2 + 0.0025704U_b^3)\Delta U_b}{1.5452 - 0.0225U_b + 0.015U_b^2 - 0.006U_b^3 + 0.0006426U_b^4}. \quad (10)$$

由(6)式、(8)式和(9)式得,对于确定的天气状态,能见度也确定,在给定的测试基线下,由于光电二极管反向偏压漂移产生的能见度测量相对误差为:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{1}{\beta L} \frac{(-0.0225 + 0.030U_b - 0.018U_b^2 + 0.0025704U_b^3)\Delta U_b}{1.5452 - 0.0225U_b + 0.015U_b^2 - 0.006U_b^3 + 0.0006426U_b^4}. \quad (11)$$

(11)式说明,对某一光电二极管而言,同样的反向偏压及其漂移,在相同的测量基线下,不同的能见度的测量误差不同;在同样能见度和测量基线情况下,反向偏压不同、反向偏压漂移相同时,产生的能见度测量误差也不同。根据(11)式可以估计不同反向偏置电压下,反向偏压漂移对能见度测量误差的贡献。

图6是能见度为20 km时,在基线为70 m下,光电二极管分别施加3.3 V、4.5 V和5.0 V反向偏压时,根据(11)式计算的反向偏压漂移产生的能见度测量相对误差值。针对2CU**型号光电二极管,施加5.0 V反向偏压时,当反向偏压漂移为-30~30 mV时,产生的能见度相对误差为0.18%~-0.18%,当反向偏压漂移为-90~90 mV时,产生的能见度相对误差为0.54%~-0.54%;当对该光电二极管加3.3 V反向偏压时,反向偏压漂移为-30~30 mV时,产生的能见度相对误差为3.98%~-3.98%,反向偏压漂移为-90~90 mV时,产生的能见度相对误差为11.94%~-11.94%。当反向偏压为4.5 V时,若反向偏压漂移为-30~30 mV,产生的能见度相对误差为2.66%~-2.66%,反向偏压漂移为-90~90 mV时,产生的能见度相对误差为7.98%~-7.98%。可见这三种反向偏压状态中,5.0 V反向偏压状态下,反向偏压漂移产生的能见度测量误差很小,而在3.3 V反向偏压状态下,反向偏压漂移对能见度测量误差贡献最大。

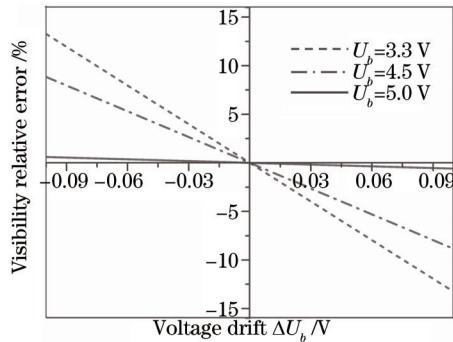


图6 能见度为20 km,基线长度为70 m时,不同反向偏置电压下电压漂移引起能见度的相对误差

Fig.6 Effect of voltage drift on visibility relative errors under different reverse bias voltages, when visibility is 20 km and baseline is 70 m

为讨论方便,引入光透过率测量相对误差,用光电二极管前置放大器输出电压相对误差表述为

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{\Delta U}{U}, \quad (12)$$

式中 T 为透过率, ΔT 为透过率误差。在一定的能见度时,透过率测量的误差将引起能见度测量误差。例如,能见度为20 km、测量基线为70 m时,1.0%的透过率测量误差将产生88%的能见度测量误差。由此可以看出,在能见度测量过程中具有误差放大效应,前一例中误差被放大了88倍。从(11)式可知,误差放大系数为 $1/(\beta L)$,同样的能见度天气状况下,当测量基线变短时,这种误差放大效应更大。

为了确保能见度测量的不确定度在允许的范围内,应尽可能降低代表光功率的测量电压的相对误差。光电探测器处于测量电压信号采样的最前端,其检测信号的误差在后续的电子线路中将被放大,并与其他环节的误差叠加,产生更大的电压测量相对误差,再经误差放大后,导致能见度测量误差超出许可范围,使能见度仪不能正常测量。因此,在低功耗能见度仪的设计和生产过程中,要对光电二极管的响应特性进行检测,选择响应时间不受反向偏压漂移影响的器件,或者使光电二极管的反向偏压设定在其检测信号输出量对反向偏压漂移不敏感的状态。例如,在本设计中,选用2CU**光电二极管作为光探测器时,其反向偏压取

为 5.0 V 较合适,不能借用系统 3.3 V 的电源电压,仍需单独设置电源。

5 结 论

反向偏置电压的变化会引起光电探测器响应时间的变化,进而影响能见度测量的不确定度。实验表明,对于大敏感面积的光电二极管,其响应时间随着反向偏置电压的增大而增大,输出电压的有效值随着反向偏置电压的增大而减小。在响应时间受反向偏置电压影响较大的区域,反向偏置电压的漂移会给能见度的测量带来较大的误差,且能见度越高测量的不确定性也越大,例如对于 2CU**光电二极管,反向偏压为 3.3 V 时,反向偏压漂移 ± 30 mV,能产生 $\mp 4.0\%$ 的能见度测量相对误差。大敏感面积的光电二极管的响应时间随着反向偏置电压的增大而增大的机理有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (6th Edition)[M]. Geneva: WMO Publish, 1996: 186-189.
- 2 Zeng Shu'er, Wang Gaili. Observation and instrument of visibility[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(2): 207-212.
曾书儿,王改利.能见度的观测及其仪器[J].应用气象学报,1999,10(2):207-212.
- 3 Xing Xiangnan, Cui Yanmei, Zhang Fugen, *et al.*. Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology[J]. Metrology and 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.
- 4 Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486-2492.
饶瑞中.大气中的视觉和大气能见度[J].光学学报,2010,30(9):2486-2492.
- 5 Xie Xingsheng, Tao Shanchang, Zhou Xiuji. Calculating visibility using digital photography[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.
- 6 Lü Lihui, Liu Wenqing, Zhng Tianshu, *et al.*. A new micro-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0908005.
吕立慧,刘文清,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.
- 7 Lin Yong, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, *et al.*. Simulation research on non-line of sight atmospheric propagation in fog weather[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0901001.
林勇,徐智勇,汪井源,等.雾环境下非视距大气散射传输特性研究[J].光学学报,2013,33(9):0901001.
- 8 Wu Dui, Deng Xuejiao, You Jiping, *et al.*. Forecast system of visibility at speed way foggy area at Nanling mountains[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(5): 417-422.
吴兑,邓雪娇,游积平,等.南岭山地高速公路雾区能见度预报系统[J].热带气象学报,2006,22(5):417-422.
- 9 C Camino, E Cuevas, S Basart, *et al.*. An empirical equation to estimate mineral dust concentrations from visibility observations in Northern Africa[J]. Aeolian Research, 2015, 16: 55-68.
- 10 Wang Qingyou. Photoelectric Sensors Application Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007: 70-96.
王庆有.光电传感器应用技术[M].北京:机械工业出版社,2007:70-96.
- 11 E J McCartney. Optics of the Atmosphere[M]. New York: John Wiley, 1976: 37-49.
- 12 Zhang Aichen. Modern Meteorological Observation[M]. Beijing: Peking University Press, 2000: 173-181.
张霁琛.现代气象观测[M].北京:北京大学出版社,2000:173-181.
- 13 Zhu Huahai. Research on the eliminating diffusion current of high speed silicon PIN photodiode[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1978, (1): 8-13.
朱华海.消除高速PIN硅光电二极管中扩散电流的研究[J].半导体光电,1978,(1):8-13.
- 14 An Yuying, Zeng Xiaodong, Feng Zhejun. Photoelectric Detection and Signal Processing[M]. Beijing: Science Press, 2010: 112-115.
安毓英,曾晓东,冯喆珺.光电探测与信号处理[M].北京:科学出版社,2010:112-115.

栏目编辑:殷建芳