DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. j1702485

用于点源透射比测试的光电探测装置设计及检测^{*}

张宁叶露宋莹

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要:采用点源透射比法可以对空间光学仪器的杂散光抑制能力进行测试。设计了一套光电探测装置来解决点源透射比测 试中宽动态探测范围和微弱信号探测的难题,并搭建一套检测设备对该探测装置的探测动态范围、微弱信号探测能力进行了检 测。光电探测装置采用硅光二极管作为光电转换器件,采用增益分级可调的前置放大电路将硅光二极管的光电流转为电压信 号并放大输出。使用单色功率为1W的RGB三光合一激光器作为光源,选择大量程减光片进行减光,搭建检测设备对光电探 测装置相关指标进行检测。分别采用蓝、绿、红光激光器作为光源进行了探测实验,实验结果表明,光电探测装置探测动态范围 达到10¹⁰,弱光探测辐照度为1.74×10⁻⁷W/m²,满足探测动态范围10¹⁰,弱光探测阈值10⁻⁷W/m²要求。该套光电探测装置能 够满足星敏感器等空间光学仪器的点源透射比法杂散光系数测试要求。

关键词: 杂散光抑制; 点源透射比; 光电探测装置; 动态范围; 弱光探测阈值 中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Design and detection for the photoelectric device used in the point source transmission testing

Zhang Ning , Ye Lu , Song Ying

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: The stray light suppression ability of space optical instrument can be tested by utilizing the method of point source transmission. In this paper, a photoelectric detection device with wide dynamic range is designed to solve the problem of wide dynamic detection range and weak signal detection in the process of point source transmission testing. A testing equipment is built to test the ability of wide dynamic detection range and weak signal detection. Silicon photo-diode is adopted as the photoelectrical conversion device. A preamplifier circuit is utilized to convert the optical current to the amplified voltage output. The RGB unification laser with the 1W monochromatic power is selected as the light source. The wide range filters are chosen as the optical filter. The related parameters of photoelectric detection device are tested by using the equipment. Three lasers including blue laser, green laser and red laser are employed as the light source for detecting experiment. The experimental results show that the detecting dynamic range can reach 10^{10} , and the irradiance of weak light detection is 1.74×10^{-7} W/m². The detection ability meets the design requirements that the detection dynamic range is 10^{10} and the irradiance is 10^{-7} W/m². Therefore, the designed photoelectric device can satisfy the point source transmission testing of stray light coefficient of space optical equipment, e. g, the star sensor.

Keywords: stray light suppression; point source transmission; photoelectric device; dynamic range; detection threshold of weak light

0 引 言

光学系统杂散光抑制能力是评价光学系统性能的一 项重要指标^[1],尤其对深空探测、空间遥感领域使用的高 近年来 国际上以美国为代表的研究机构多以点源 透射比(point source transmission ,PST)的概念评价太空 望远镜等空间光学仪器的杂散光抑制能力^[5]。2000 年,

端光学仪器^[2-4],杂散光抑制能力直接关系到所执行任务的成败。

收稿日期: 2017-08 Received Date: 2017-08

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(61675189) 项目资助

Wuhrer C 等人^[6]介绍了 XMM Telescope 的 PST 测试系统 该测试系统整体置于空气洁净度为 class 5 的实验室 内 系统测试精度达到了 10⁻¹⁰ 量级; 2008 年美国 Ball Aerospace & Technologies Corp 研制了一种新型杂散光测 量设备^[7] 2010 年该设备对陆地成像仪(operational land imager ,OLI) 的杂光测试精度达到了 10⁻⁹ 量级^[8]。

据公开资料报道 ,国内最新的 PST 测试装置及其测试能力如下: 2011 年中国科学院长春光学精密机械与物 理研究所的杨林等人^[9]的极紫外太阳望远镜杂散光 PST 测试装置,实测 PST 数据约为 10⁻⁶量级; 2014 年中国科 学院西安光学精密机械研究所的徐亮等人^[10]的月基望 远镜杂散光 PST 的测试装置,在 ISO class 8 的常压洁净 间内,实测 PST 测试值达到 10⁻⁷。

上述文献中重点描述了 PST 的测试原理、测试设 备搭建以及测试环境要求等,对光电探测器提到采用 硅光二极管(PD)以及前置放大电路、锁相放大等,但 对具体实现和探测范围标定过程较少提及。目前采用 PD 探测器进行光电探测的研究主要集中在微弱信号 测试以及噪声抑制方面。文献[11]搭建的探测系统可 以实现对动态范围 10⁻¹¹~10⁻⁴A 微电流信号进行有效 测量。但测量范围小于本文要求的 10¹⁰测量范围;文 献[12]分析了在对线性响应及噪声进行了分析,但是 线性响应范围不满足本文要求,同时对宽线性响应的 测试方法没有涉及。

为满足点源透射比探测需要,本文设计了一种光电 探测装置,采用硅光二极管作为光电探测器件,设计了前 置放大电路对信号转换放大,并进行了噪声抑制和滤波 处理。设计的光电探测装置探测动态范围 10¹⁰,探测弱 光探测阈值为 10⁻⁷ W/m²,则探测电流达到 pA 量级。由 于没有专门的仪器对如此大范围的光电探测装置进行检 测和标定,只能通过间接方式对光电探测范围和辐照度 绝对测量范围进行检测。为此,本文专门搭建一套检测 设备对光电探测装置的探测范围和探测线性度进行了检 测实验。

1 光电探测装置线性探测范围分析

1.1 点源透射比法杂散光系数测试原理

光学系统轴外视场角 θ 处点源目标的辐射,经光学 系统后在像面产生的辐照度 $E_a(\theta)$ 与其在光学系统入瞳 处辐照度 E_i 的比值称为点源透射比,其数学表达式如 式(1) 所示。

$$PST(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i}$$
(1)

PST 测试系统主要由模拟目标源、光束准直系统、光 陷阱系统、转台及远程控制机构、光电探测装置、数据采 集处理系统、环境保障系统等组成,如图1所示。根据点 源透射比测试(见式(1)),采用两套参数尽可能相同的 光电探测装置1、2分别探测被测光学镜头入瞳、出瞳位 置的辐照度,采用具有更高弱光探测能力的光电探测器 3 监测背景杂散光,光电探测器3 探测器件采用了光电 倍增管。其中光电探测装置测量模拟目标源的辐照度, 完成信号的光电转换以及后续放大处理和模数转换等, 是 PST 测试系统的核心部件。



图 1 PST 测试系统组成框图 Fig. 1 Diagram of PST testing system

1.2 光电探测装置线性探测范围分析

点源透射比测量值达到 10^{-10} ,为表述方便,其动态探测范围取点源透射比的倒数,即 10^{10} 。转台带动 光学镜头在 $0 \sim 180°$ 范围内转动,使 $E_d(\theta)$ 变化,光 电探测装置能够在整个探测范围内能够实现线性、连 续测量。

根据点源透射比探测要求,本文设计的探测装置弱 光探测阈值为 10⁻⁷ W/m²,微弱电流达到 pA 级,此时信 噪比达到 26.5 dB,对于采用 PD 作为探测器进行弱电流 测试来说处于非常强的探测能力。本文提出了一种探测 范围测试方法,并在实验室环境下搭建了一套实验装置 进行验证,证明该测试方法满足探测范围测试要求,并且 搭建方便、成本低,便于快速开展实验。

2 光电探测装置探测原理及实现

2.1 光电探测及辐照度测量原理

光电探测装置将光辐射能变为电流或电压信号进行 测量,是最常使用的光信号探测装置。

为使探测装置的强光探测和探测动态范围满足要求 同时借鉴文献[7]的相关探测方案,对宽动态信号的 探测采用硅光二极管实现,选用日本滨松公司产品,型号 S1226-8BK。

PD 将光信号转换为电流信号输出,通过运算放大电路将电流转为电压信号并进行放大、滤波处理^[13-4],然后送至 AD 采集卡进行采集处理。

当 PD 产生的光电流为 *I_p* 在放大电路输出端产生电压为:

$$V = I_p R_f$$

(2)

通过改变电阻 R_f 大小 ,实现放大倍率的改变。当输 入光信号辐照度为 H 时 ,输出电压公式如下:

 $V = I_{p}R_{f} = P \times E \times S \times R_{f}$ (3) 式中: P 为 PD 光电转换灵敏度,单位为 A/W; E 为输入 光信号辐照度; S 为探测装置有效面积; R_{f} 为前置放大电 路增益。根据式(3),如果准确测量输出电压 V,并就可 以根据式(3)计算得到辐照度 E_{o}

2.2 前置放大电路设计

光电探测装置探测范围要求达到 10¹⁰,前置放大电路无法采用一级增益实现,为此需要采用多级放大增益切换的方式实现。

为保证装置具有良好的线性探测能力,要求增益 分级跨度不宜过大。根据设计需要,运放运算放大电 路选用美国 Analog Devices 公司的 AD549,其放大增益 R_f 分为 8 级,阻值分别为 100 Ω_{1} k Ω_{10} k Ω_{100} k Ω_{1} 1 M Ω_{10} M Ω_{100} M Ω_{1} G Ω_{0} 通过旋钮开关 K1 ~ K8 手动切换。其中前置放大电路输出电压 Vo 范围为 - 10 V ~ 10 V。

为减少反馈电阻热噪声,采用高精度低温漂的精密 电阻,精度0.5%,温漂25×10⁻⁶/℃。利用6位半高精 度万用表对放大电路精密电阻进行了筛选和测量,测量 阻值用于辐照度计算。

前置放大电路输出的电压信号为模拟信号,需要利 用 AD 采集卡将模拟信号转为数字信号并送至计算机进 行处理和显示。选择台湾凌华科技公司的 24 位高性能 USB 接口外置 AD 采集卡。USB-2405 板载 24 位 α-β ADC,支持反失真滤波,并且低通滤波截止频率可根据不 同采样频率自动调整,能够更有效地抑制噪声对测量精 度的影响。

2.3 辐照度探测范围计算

PD 的光电灵敏度 *P* 是一条与目标光源的波长相关的曲线,为便于计算探测辐照度,采用单波段照射 PD。 当目标光源波长为 532 nm 时,*P* = 0.3 A/W。S1226-8BK 有效探测面积 5.8 mm × 5.8 mm。此时按照式(3) 计算 辐照度探测值和探测范围,如表 1 所示。表 1 中,为简化 计算,数据均选择理论值进行计算。

经计算 根据 PD 按5 V 输出 测试电流 50 mA 辐照 度测量最大值达到 4 954.4 W/m²。当档位调制 K8 , R_f 为 1 GΩ,采用 24 位 AD 采集卡,按最低电压输出 5 mV 时,计算测量辐照度值为 4.9×10⁻⁷ W/m²。此时,辐照 度测量阈值具备 $10^3 \sim 10^{-7}$ W/m² 的探测能力,探测范围 满足 10^{10} 要求,PD 工作在线性区域内,保证能够进行线 性探测。

表1 前置放大电路增益及探测能力

 Table 1
 Detecting ability and gains of the preamplifier

circuit								
档位	阻值/ Ω	电压/V	电流/A	辐照度/(W•m ⁻²)				
1	100	5	5×10^{-2}	4.9 × 10^3				
2	1×10^3	0.5	5×10^{-4}	4.9×10				
3	1×10^4	0.5	5×10^{-5}	4.9				
4	1×10^5	0.5	5×10^{-6}	4.9 × 10 ⁻¹				
5	1×10^{6}	0.5	5×10^{-7}	4.9×10^{-2}				
6	1×10^7	0.05	5×10^{-9}	4.9×10^{-4}				
7	1×10^8	0.05	5×10^{-10}	4. 9 × 10 $^{-5}$				
8	1×10^{9}	0.005	5×10^{-12}	4.9 $\times 10^{-7}$				

3 探测动态范围检测方法及检测实验

3.1 探测范围检测原理及检测设备集成

光电探测装置研制完成后需要对其探测性能进行测试,包括辐照度探测阈值和线性探测动态范围,但目前没 有能够直接对探测装置进行测试和标定的仪器。为此, 搭建了一套检测设备对光电探测装置的性能指标进行 测试。

检测基本原理为搭建一套辐照度调节范围达到光电 探测装置探测阈值要求的模拟目标源,模拟目标源的光 强能够等间隔或者近似等间隔的调整,保证测试过程中 能够得到相对多的数据。为保证检测精度,必须对背景 杂散光进行控制,解决措施为检测过程在洁净暗室中 完成。

根据 PST 测试精度要求,光电探测装置探测范围的 具体精度只有量级要求,而没有数值要求,则只需完成量 程级测试即可。基于此,模拟目标源采用量级调整方式, 调整方式采用中性减光片减光完成。相邻两级减光片减 光率为10,共分为8级减光。

根据点源透射比测试要求,光电探测能力需要达到 10³ W/m² 量级,即一个太阳常数。为此,本项目必须选 择强光光源作为检测光源,采用中性减光片进行减光生 成具有大量程的模拟目标源。

空间光学仪器在空间的杂光光源主要为太阳、月亮 等。采用太阳模拟器作为光源,则光谱特性与实际情况 最接近,但通用中性减光片减光范围一般在400~ 700 nm,太阳模拟器光谱范围至少达到1100 nm,用于辐 照度探测的PD光谱探测上限也达到了1000 nm。则检 测设备减光片对光谱为700 nm 以上的光不能起到减光 作用,从而无法产生大量程减光效果。 理论分析和大量实验表明,采用单色激光器作为 光源适合点源透射比测试。本文选择长春新产业公司 的三光合一激光器作为检测光源。激光器包括波段为 447、532、635 nm 的三路激光器,每路功率1 W,激光器 通过合光光路能够合光输出。由于激光器输出光束发 散角小,在光电探测装置有效面积内光束不均匀,从而 影响检测精度。为解决这个问题,通过光纤导光至积 分球,在积分球出口输出均匀漫反射光源用于辐照度 探测。

采用美国 Thorlabs 公司的吸收型中性密度减光片减 光,光密度范围达到 1.0~8.0。吸收型采用 Schott 玻璃 加工而成,在 400~650 nm 可见光范围内具有平坦吸收 率。吸收线密度曲线如图 2 所示。大量测试表明,减光 片光密度在量级范围内非常准确,与图 2 所示曲线基本 一致。由于点源透射比测试范围达到 10⁹ 甚至更高范 围,测试过程中也只对测量量程提出要求,对具体量程内 的值不做要求,因此该减光片线性度满足点源透射比测 试要求。



图 2 减光片吸收曲线 Fig. 2 Absorbing curves of filters

减光片损伤阈值 10⁵ W/m² 激光器不会对减光片造成损伤。

根据辐照度公式 $E = \frac{I}{r^2} \cos \theta$, 辐照度 E 与距离 r 的

平方成反比,探测装置在更换减光片时需要移动光电探测装置。为保证探测过程中光电探测传感器到光源空间 位置保持不变,对检测设备进行了集成,如图3所示。将 积分球固定在升降平台上,具备升降调整能力。将光电 探测装置固定在高精度一维调整台上,实现光电探测装 置的左右移动调整。再将调整台安装到高精度直线导轨 上,导轨带有限制机构,保证光电探测装置更换减光片后 的探测空间位置保持不变,从而保证更换减光片时不引 入位置变化带来的辐照度探测误差。积分球、光电探测 装置、调整机构如图4所示。



图 3 检测设备 Fig. 3 Testing equipment



图 4 积分球、光电探测装置及调整机构 Fig. 4 Integrating sphere, photoelectric device and adjusting mechanism

3.2 检测实验及数据分析

利用单色激光器功率为1W的合光激光器作为光源, 采用减光片实现8级减光,对设计的光电探测装置探测范 围进行检测。输出电压经 AD采集卡输出后由测试软件进 行采集进行数字中值滤波处理,然后按照式(1)计算得到 辐照度值,并将值取 log10得到探测范围。对数据取对数 后得到电流曲线以及减光片减光对数值曲线。

检测实验在暗室环境下进行,采用了日本滨松公司 的集成化电压型光电倍增管模块(型号 H9306-4)作为光 电探测装置件对暗室背景杂散光进行了实时监测^[1546]。

利用光电倍增管模块在暗室内进行测试,增益设为 1.0 V 信号均方根 0.58 mV。在暗室内,PMT 输出信号主要 包括背景光输出信号以及 PMT 自身噪声、信号采集噪声等。 经计算 辐照度值 4.8×10⁻¹¹ W/m² 测试环境满足要求。

1) 蓝光激光光源探测

采用蓝光激光器作为光源进行测试,激光波长 447 nm,PD光电灵敏度0.22。蓝光测试数据如表2所示,电流、辐照度对数曲线如图5所示。

Table 2Detection data using blue laser as light source								
减光片光密度	R_f/Ω	电压/mV	均方根误差/mV	电流/mA	电流对数值	辐照度/(W•m ⁻²)	辐照度对数值	
0	100	248.01	0.072	2.47	0. 39	3.34×10^{2}	2. 52	
1.0	1×10^4	709.99	0.039	7.09 × 10 $^{-2}$	-1.15	9. 59	0. 98	
2.0	1×10^4	47.32	0.024	4. 73 × 10 $^{-3}$	-2.33	6. 39×10^{-1}	-0.19	
3.0	1×10^{6}	304.92	0.057	3. 05 $\times 10^{-4}$	-3.53	4. 12×10^{-2}	-1.38	
4.0	1×10^{6}	26.09	0.053	2. 61 × 10 $^{-5}$	-4.58	3. 88 $\times 10^{-3}$	-2.41	
5.0	1×10^7	24.46	0.059	2. 45 × 10 $^{-6}$	- 5. 61	2. 42×10^{-4}	- 3. 61	
6.0	1×10^9	72.56	0.052	6. 63 × 10 $^{-8}$	-7.18	8.95 × 10 $^{-6}$	- 5.05	
7.0	1×10^9	6.50	0.061	5. 94 $\times 10^{-9}$	-8.23	8. 02 × 10 $^{-7}$	- 6. 10	
8.0	1×10^{9}	1.41	0.066	1.29×10^{-9}	- 8.89	1. 74 \times 10 $^{-7}$	- 6. 76	







此时探测装置探测最低电流为 1.29 pA ,辐照度为 1.74 × 10^{-7} W/m² ,动态探测范围 10^{9} 。

由于 PD 对蓝光灵敏度较低,同时接近减光片减光 下限,减光片减光值与理论值差距较大,因此对数曲线 出现弯曲。减光片光密度 8.0 时,探测装置采用 1 GΩ 档位,探测电压平均值 1.413 mV,均方根值为 0.066 mV,信噪比为 26.5 dB。由于减光片线性度问题,不宜采用蓝光激光光源对对光电探测装置探测性 能的检测。

2) 绿光激光光源探测

采用绿光激光器作为光源进行测试,激光波长 532 nm,PD光电灵敏度0.3。绿光测试数据如表3所示, 电流、辐照度对数曲线如图6所示。

表 3 采用绿光激光光源的探测数据 Table 3 Detection data using green laser as light source

	P. / O					2	
减光片光密度	K_f/Ω	电压/mV	均万根误差/mV	电流/mA	电流灯数值	辐照度/(₩•m ⁻²)	辐照度灯数值
0	1×10^{3}	1.09×10^{3}	0.059	1.09	0.04	1.08×10^{2}	2.03
1.0	1×10^{3}	1.14×10^{2}	0.029	1. 14 \times 10 $^{-1}$	-0.94	11.3	1.05
2.0	1×10^4	93.05	0.024	9. 30 × 10 $^{-3}$	- 2. 03	9. 22×10^{-1}	-0.04
3.0	1×10^{5}	73.87	0.138	7. 4 $\times 10^{-4}$	-3.13	7. 34×10^{-2}	-1.13
4.0	1×10^{6}	71.41	0.075	7. 14 $\times 10^{-5}$	-4.15	7.07 $\times 10^{-3}$	-2.15
5.0	1×10^7	66.62	0.059	6. 67 × 10 $^{-6}$	-5.18	6. 61 $\times 10^{-4}$	-3.18
6.0	1×10^9	611.30	0.343	5. 58 $\times 10^{-7}$	-6.25	5. 53 $\times 10^{-5}$	-4.26
7.0	1×10^9	54.44	0.089	4. 97 × 10 $^{-8}$	-7.30	4.93 × 10 $^{-6}$	-5.31
8.0	1×10^{9}	6.89	0.056	6. 29 × 10 $^{-9}$	-8.20	6. 23 × 10 $^{-7}$	-6.21



此时探测装置探测最低电流为 6.29 pA 此时辐照度为 6.23×10^{-7} W/m² 此时动态探测范围 10° 达到设计要求。

由于 PD 对绿光灵敏度高,同时减光片具有较好的 减光特性,因此对数值近似直线,说明探测装置在该 532 nm波段具有良好的线性探测能力。

3) 红光激光光源探测

采用红光激光器作为光源进行测试 激光波长635 nm, 此时 PD 光电灵敏度 0.34。为 PD 最高探测灵敏度 测试数 据如表 4 所示 电流、辐照度对数曲线如图 7 所示。

Table 4 Detection data using red faser as light source							
减光片光密度	R_f/Ω	电压/mV	均方根误差/mV	电流/mA	电流对数值	辐照度/(W•m ⁻²)	辐照度对数值
0	1×10^{3}	1 229. 24	0. 124	1.23	0. 08	1.08×10^{2}	2.03
1.0	1×10^3	129.41	0.046	1. 29 $\times 10^{-1}$	-0.89	11.3	1.05
2.0	1×10^{3}	13.73	0.028	1. 37 $\times 10^{-2}$	- 1.86	1.20	0. 08
3.0	1×10^{6}	1 251.64	0.208	1. 25 × 10 $^{-3}$	- 2. 90	1.09×10^{-1}	-0.96
4.0	1×10^{6}	137.46	0.055	1. 37 $\times 10^{-4}$	- 3.86	1. 20 × 10 $^{-2}$	- 1. 92
5.0	1×10^{6}	13.08	0.061	1.31×10^{-5}	-4.88	1. 14 \times 10 ⁻³	-2.94
6.0	1×10^7	17.69	0.099	1. 77 $\times 10^{-6}$	- 5.75	1. 55 $\times 10^{-4}$	-3.81
7.0	1×10^9	197.62	0.075	1.80 × 10 $^{-7}$	-6.74	1.58 $\times 10^{-5}$	-4.80
8.0	1×10^{9}	15.54	0.057	1.42×10^{-8}	-7.84	1. 24 × 10 $^{-6}$	- 5. 91

表 4 采用红光激光光源的探测数据 Table 4 Detection data using red laser as light source



图 7 红光光源电流、辐照度对数曲线 Fig. 7 Logarithmic curves of red light current and irridiance

此时探测装置探测最低电流为 1.42 pA ,此时辐照度 为 1.24 × 10⁻⁶ W/m²。由于 PD 对红光灵敏度最高 ,同时 减光片具有较好的减光特性 ,因此对数值近似一条直线。

4) 辐照度探测上限测试实验

光电探测装置的探测动态范围采用大量程减光片减 光方案进行检测,检测范围受减光片减光范围制约。因此,对于强光探测能力检测与弱光探测只能分别进行。 由于强光探测不是本文研究重点,仅采用红光光源进行 了探测试验,验证具备 10³ W/m² 的强光探测能力,且具 有良好的线性度。

采用红光激光作为光源,光电探测装置采用 100 Ω 档 位 输出电压 1 208.6 mV,根据式(3) 计算得到辐照度值 1.053×10^3 W/m²。此时探测下限为 1.48×10^{-5} W/m²。 探测电流对数曲线和辐照度对数曲线如图 8 所示。此时, 如果检测设备能够继续进行线性减光,则可以进一步扩大 检测范围。

3.3 探测误差及影响因素分析

影响探测结果的主要误差源包括激光器输出功率不稳 定带来的误差、背景杂散光干扰、光电探测器自身暗电流、热 噪声以及 AD 采集误差 以及电磁干扰带来的误差等。

1) 激光器功率稳定性采用激光功率计进行了测量,



图 8 红光光源上限测试电流、辐照度对数曲线 Fig. 8 Logarithmic curves of red light current and irridiance of up limit

功率稳定性为 0.28%;

2) 暗室环境保持不变,采用完全不透光的挡板挡住 光电探测装置入瞳,测试输出电压。增益100 时输出电 压 0.13 mV 均方根值为 0.025 6 mV ,当增益为10[°] 时输 出电压 0.16 mV 均方根值为 0.064 mV;

3) 暗室背景杂散光辐照度值 4.8 × 10⁻¹¹ W/m²。

将上述干扰误差均等效为测量输出电压进行计 算。以红光测试为例进行分析: 当增益为 10³ 时,激光 稳定误差为 3.44 mV,暗电流等误差为 0.025 6 mV,背 景杂散光输出电压可忽略不计。此时测量均方差误差 为3.44 mV。当增益为 10⁹ 时,激光稳定误差为 0.043 5 mV,暗电流等误差为 0.064 mV,背景杂散光 输出电压可忽略不计。此时测量均方差误差为 0.077 5 mV。通过分析,当采用测量强光时主要误差 来自光源稳定性,随着减光密度增大,暗电流等影响 增大。

进行点源透射比测试时,高稳定性的激光光源是提 高测量精度的重要保障。

为提高探测精度,减少噪声干扰,在前置放大电路设 计过程中应进行低噪声处理和干扰抑制^[17],包括接地、 屏蔽、电路低噪声设计与抑制、供电等。

98

3.4 探测实验分析

分别采用蓝、绿、红单色激光器作为激光光源,采 用吸收型中性密度减光片减光进行线性探测范围进行 实验。受减光滤光片限制,无法一次性完成光电探测 装置探测范围和弱光探测阈值检测实验。因此采用探 测上限和弱光探测阈值发分别测试的方法。实验表 明,光电探测装置达到探测范围10¹⁰和最低探测阈值 10⁻⁷W/m²的设计要求,同时具有良好的线性度,满足 点源透射比测试要求。采用绿色、红色激光器均可作 为光源进行点源透射比测试。但是受减光片减光能力 限制,本文没有能够对设计的光电探测装置极限探测 能力完成测试。

4 结 论

基于点源透射比测量的弱信号宽动态范围高精度线 性探测技术是光学系统点源透射比法杂散光系数测试中 的一项核心技术,通用辐照度探测仪器无法满足要求。 为此,本文设计了一套光电探测装置,该探测装置采用日 本滨松公司型号为 S1226-8BK 的硅光二极管作为光电探 测器,采用 AD549 低温漂运算放大器设计了前置放大电 路。为实现大范围线性探测,放大增益分为8级,通过旋 钮实现切换。该光电探测装置具备 $10^3 \sim 10^{-7} \text{ W/m}^2$ 的 辐照度探测能力 探测动态范围 10¹⁰ 使 PD 工作在线性 区域内,保证能够进行线性探测。由于缺少对大范围光 电探测装置进行检测的仪器和手段,本文搭建了一套检 测设备对光电探测装置的辐照度探测能力和探测动态范 围进行检测。检测设备采用 RGB 三光合一激光器作为 光源,单模块功率1W。采用光密度范围达到1.0~ 8.0 的中性减光片减光产生大量程的光源,对光电探测 装置的探测动态范围和最低探测阈值进行了探测实验, 实验表明 探测动态满足 10¹⁰要求 采用蓝光光源时弱光 探测辐照度为 1.74 × 10⁻⁷ W/m² ,达到探测装置弱光探 测阈值为10⁻⁷W/m²的设计要求。实验表明,本文设计 的光电探测装置能够满足点源透射比探测要求 搭建的 实验装置满足宽动态光电探测装置宽动态范围和线性测 试需要 解决了宽动态探测装置探测范围无法测试的 难题。

参考文献

 [1] 朱杨,张新,伍雁雄,等.紫外宽幅离轴四反光学系统 设计及其杂散光分析[J].中国激光,2015,42(2): 313-319.

> ZHU Y , ZHANG X , WU Y X , et al. Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis four mirrors optical system [J]. Chinese Journal of Lasers ,

2015,42(2): 313-319.

- [2] 颜昌翔, 许杰 彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂 散光抑制[J]. 光学精密工程 2010,18(2):289-293.
 YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 289-293.
- [3] 杨林,李达,崔天刚,等.空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除[J].光学精密工程,2011,19(7):1456-1463.
 YANG L, LI D, CUI T G, et al. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. Optics and Precision Enginerring,2011,19(7):1456-1463.
 [4] 林剑春,孙丽巍,陈博洋,等. 同轴两反光学系统杂散
- [4] 林剑香, /小丽魏, /陈博洋, /寺. 同轴两反光学系统宗散 光分析及内遮光罩优化设计 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 244-247.

LIN J CH , SUN L W , CHEN B Y , et al. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask [J]. Chinese Journal of Laser , 2013 , 40(1) : 244-247.

- [5] 曹智睿 /付跃刚,田浩.空气洁净度对点源透射比测试 准确度的影响[J].光子学报 2016 45(1):80-85.
 CAO ZH R, FU Y G, TIAN H. Impact for the air cleanliness to the precision of PST test [J]. Acta Phytonica Sinica, 2016, 45(1): 80-85.
- [6] WUHRER C, BIRKL R A, DE ZOETEN P, et al. PST measurements and wide angle straylight analyses of the XMM (X-ray multi mirror) [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000: 113-122.
- [7] FLEMING J, GROCHOCKI F. New stray light test facility and initial results [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7096(4): 7–11.
- [8] GROCHOCKI F, FLEMING J. Stray light testing of OLI telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7794 (1): 28-38.
- [9] 杨林,李达,崔天刚,等.空间太阳望远镜在极紫外波段成像检测中的杂散光测量与消除[J].光学精密工程2011,19(7):1456-1463. YANG L, LI D, CUI T G, et al. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1456-1463.
- [10] 徐亮,赵建科,薛勋,等.月基望远镜杂散光 PST 研究 与测试[J]. 红外与激光工程,2014,41(4):1289-1295.

XU L , ZHAO J K , XUE X , et al. PST research and measurement of Iunar-Based optical telescope stray

light[J]. Infrared and Laser Engineering , 2014 , 41(4): 1289-1295.

- [11] 周艳明,谢中,王祝盈,等. 宽量程微电流测量系统[J].物理实验 2006 26(11):18-23.
 ZHOUYM,XIEZH,WANGZHY,et al. Wide range weak current integrated amplifier [J]. Physics Experimination, 2006, 26(11): 18-23.
- [12] 郑培超,于斌,刘克铭,等. 硅光二极管光电检测电路的研究与设计[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2013 25(8):484-488.
 ZHENG P CH, YU B, LIU K M, et al. Design of silicon

photodiode detection circuit [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2013, 25(8): 484-488.

[13] 闫书雄, 奉键洲, 石梦桐, 等. 用于飞行时间质谱仪的 微电流检测模块[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 64-68.

YAN SH X , GU J ZH , SHI M T , et al. Micro-current measurement module for TOF-MS [J]. Electronic Measurement Technology , 2016 , 39(9) : 64-68.

- [14] 谢锐 裴东兴 姚琴琴. 高频信号动态测试中的信号完整性分析[J]. 仪器仪表学报 2017 38(3):773-779.
 XIE R, PEI D X, YAO Q Q. Signal integrity analysis in high-frequency signal dynamic test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 773-779.
- [15] 张宁 沈湘衡,叶露,等.应用光电倍增管模块的杂光 系数测试与分析[J].电子测量与仪器学报,2015, 29(8):1203-1209.

ZHANG N, SHEN X H, YE L, et al. Stray light coefficient testing and analysis by using the new type photomultiplier tube module [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1203–1209.

[16] 赵文锦. 光电倍增管的技术发展状态 [J]. 光电子技术, 2011 31(3):145-148.
 ZHAO W J. Developments in technology of

Photomultipliers [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(3): 145-148.

[17] 罗毅 杨昆,董麟,等.开关触点接触电阻动态测量方法研究[J].仪器仪表学报 2015 36(1):49-55.
 LUO Y, YANG K, DONG L, et al. Research on dynamic measurement method for button contact resistance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

2015,36(1):49-55. 作者简介



张宁 2010 年于中国科学院长春光学精 密机械与物理研究所获博士学位,现为中国 科学院长春光学精密机械不与物理研究所 副研究员,主要研究方向为光电测量设备精 密检测技术。

E-mail: ning0025@163.com

Zhang Ning received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science in 2010. He is currently an associate researcher in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research interests include precision measurement and development of photoelectric equipment.