

文章编号 1004-924X(2026)01-0044-09

基于紫外增强空间光调制技术的 单光子计数成像探测系统

郭乃菲¹, 孙 亮¹, 何玲平¹, 马天奇¹, 陶 琛¹, 王 玮¹, 闫万红^{1,2*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对空间天气监测、紫外预警侦查及高端分析仪器等领域对探测器的高灵敏度和大动态范围探测能力的需求, 结合面阵单光子计数器在紫外波段高灵敏度、低噪声的优势和紫外增强数字微镜器件小像素尺寸、高空间光调制速率的特点, 研制了一种单光子计数紫外成像探测系统。该系统可以实现对每个像元接收光谱时序的动态调节, 对到达面阵单光子计数器的光子进行像素级调制。当识别到目标光谱信号较弱时, 可以通过编码调制方法实现对探测目标成像区域信噪比的提高; 当识别区域和空间域的相关算法控制, 实现对应的图像传感器像素点不同层次的光强控制, 使饱和区域处的光强快速调节至图像传感器最佳区域。设计了该系统内部的耦合光学结构, 对其波长范围、暗计数率和动态范围等指标进行了测试。结果表明, 其响应波段为 180~320 nm, 动态范围为 163.9 dB, 暗计数率为 0.481 cps/cm², 系统传递函数 > 0.6, 符合设计要求。该系统可以实现对于紫外光谱信号的高灵敏度、低暗计数率、小像素尺寸和高空间光调制速率的成像探测, 为我国紫外波段高灵敏度成像探测等领域提供关键技术支撑。

关键词: 短波光学; 紫外成像; 单光子计数成像; 空间光调制; 耦合成像; 高灵敏度探测

中图分类号: O439; TH74 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263401.0044

CSTR: 32169.14.OPE.20263401.0044

Single-photon-counting imaging detection system based on UV-enhanced spatial light modulation technology

GUO Naifei¹, SUN Liang¹, HE Lingping¹, MA Tianqi¹, TAO Chen¹, WANG Wei¹, YAN Wanhong^{1,2*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: 18844189973@163.com

Abstract: To meet the increasing demand for high-sensitivity, large-dynamic-range detection in space weather monitoring, ultraviolet (UV) early-warning reconnaissance, and advanced analytical instrumentation, a single-photon-counting UV imaging detection system is presented. High sensitivity and low noise in the UV band are achieved by integrating an array single-photon counter with a UV-enhanced digital micromirror device (DMD) featuring small pixel size and a high spatial light-modulation rate. Dynamic ad-

收稿日期: 2025-11-17; 修订日期: 2025-11-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62205331); 国家重点研发计划基础科研条件与重大科学仪器设备研发项目 (No. 2022YFF0708500)

justment of spectral sequences on a per-pixel basis is enabled, and pixel-level modulation of incident photons is implemented at the array single-photon counter. When weak target spectral signals are identified, an encoding modulation strategy is applied to improve the signal-to-noise ratio (SNR) within the target imaging region. Based on region identification and spatial-domain correlation, multi-level irradiance control is imposed on corresponding sensor pixels, allowing saturated regions to be rapidly driven into the optimal response range. The coupled internal optical architecture is described, and key performance metrics including wavelength range, dark count rate, and dynamic range are evaluated. Experiments demonstrate a response wavelength range of 180-320 nm, a dynamic range of 163.9 dB, a dark count rate of 0.481 cps/cm², and a system transfer function exceeding 0.6, consistent with the design targets. The developed system supports high-sensitivity UV spectral imaging with low dark counts, fine spatial resolution, and high-speed spatial modulation, providing enabling technology for high-sensitivity UV imaging applications in China.

Key words: shortwave optics; UV imaging detection; single-photon-counting imaging; spatial light modulation; coupled imaging; high-sensitivity detection

1 引言

日盲紫外波段成像探测技术在地球表面太阳背景辐射近乎为零,因此在空间天气监测、高压电晕检测、导弹预警领域中具有不可替代的优势^[1-2]。但上述领域不仅需要探测器具备极高的灵敏度与极低的暗噪声,还要求探测器拥有宽动态范围以适应悬殊的信号强度,以及高空间分辨率以实现复杂光谱的精确分辨。

现有紫外成像探测系统主要基于电荷耦合器件(Charge-coupled device, CCD)和互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)技术,但因其固有的暗电流噪声较大,对微弱紫外波段信号的探测能力有待提高^[3-4]。增强型CCD(Intensified CCD, ICCD)虽然可以实现微弱辐射光谱的高性能检测,但必须采用深度制冷措施降低电路暗噪声和高读出帧频,高成本和复杂性限制了它在上述领域的应用^[5]。饶志敏等^[6]基于紫外激光诱导生物荧光光谱技术对ICCD的探测灵敏度进行的比对分析,对生物气溶胶最小检测浓度偏高(相对偏差达33.9%~40.2%),其探测性能有待进一步提高。长春光机所陈波团队研制的楔条形阳极(Wedge-and-Strip Anode, WSA)面阵单光子计数器已成功应用于嫦娥三号极紫外相机和风云三号D星广角极光成像仪等宇宙微弱极紫外光

谱的空间光学遥感成像设备中,实现了对地球等离子体和极光的在轨长期有效探测^[7-9]。然而,面阵单光子计数器在动态范围和空间分辨率方面仍存在进一步提升的空间^[10-12]。

为了扩大面阵单光子计数器的动态范围和空间分辨率,空间光调制器成为关键使能技术。传统液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)因液晶材料的紫外吸收特性,难以在紫外波段实现有效调制。天津大学冯维等^[13]通过数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)相机实现像素级编码曝光,灵活调制入射光时空信息以使各像素始终处于合理曝光范围,从而突破传统相机动态范围限制实现高动态范围成像。而DMD作为一种反射式空间光调制器,兼具微镜单元尺寸小、翻转速率高、没有宏观移动部件等优势,通过紫外增强工艺处理后,可有效工作在紫外波段,为紫外成像探测提供了新的技术途径^[14-15]。

本文将紫外增强数字微镜器件与航天用面阵单光子计数器进行耦合,研制出一种单光子计数紫外成像探测系统。该系统充分利用面阵单光子计数器在紫外波段的高灵敏度、低噪声优势,以及紫外增强DMD的小像元尺寸和高空间光调制速率特点,实现对于紫外光谱信号的高灵敏度、低暗计数率、小像元尺寸和高空间光调制速率的单光子计数成像探测。

2 原理

2.1 单光子计数紫外成像探测系统的结构组成

单光子计数紫外成像探测系统采用模块化集成设计,主要由紫外光源系统、紫外空间光调制器、面阵单光子计数器、耦合光学系统、DMD 驱动电路、高压电源、信号处理电路和上位机组成,如图 1 所示。其中,紫外空间光调制器采用中国科学院长春光机所提供的紫外增强数字微镜器件(基于美国德州仪器 DLP9500 型号 DMD 器件改造)进行紫外增强作为高速二进制光闸,其微镜阵列数量为 $1\,920 \times 1\,080$,微镜单元尺寸为 $10.8\,\mu\text{m} \times 10.8\,\mu\text{m}$ 。该器件可通过上位机软件对驱动电路进行实时在线编程,实现微秒级微镜阵列翻转刷新,完成对入射紫外光的可编程选通与编码掩膜调制。面阵单光子计数器采用长春光机所自研的楔条形阳极面阵单光子计数器,可对 $180 \sim 320\,\text{nm}$ 波段内的光谱信号进行有效探测,其等效像元尺寸约为 $60\,\mu\text{m} \times 60\,\mu\text{m}$,具备探测灵敏度高、暗计数率低等优点。耦合光学系统采用全反射式结构,由一片凸面反射镜、一片凹面反射镜及耦合光室组成。两片反射镜同轴水平固定于光室内,该光路系统结构设计可以有效保证紫外增强 DMD 法线与镜筒轴成 24° 入射角,通过优化布局实现光学系统的像差校正与紧凑化设计。

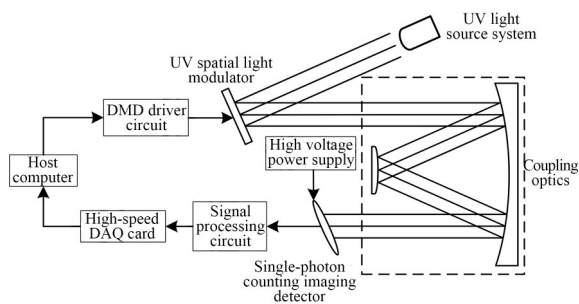


图 1 单光子计数紫外成像探测系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of single-photon-counting ultra-violet imaging detection system principle

2.2 单光子计数紫外成像探测系统工作原理

该系统基于空间光调制-单光子探测协同工作机制,可实现对紫外波段光谱信号的高灵敏

度成像与动态范围扩展。紫外光源系统光线首先入射至紫外增强 DMD 微镜阵列表面,通过控制其微镜阵列组的二元开关状态,在二维空间内构建可编程光学编码掩膜。当微镜处于“on”态时,光线以特定角度反射进入耦合光学系统,经凸面镜与凹面镜组成的无焦系统缩束成像后,在面阵单光子计数器面阵单光子计数器靶面对应位置形成空间分辨的光子分布;当微镜处于“off”态时,光线被偏转至吸收阱,无法到达面阵单光子计数器面阵单光子计数器。该机制实现了对每个空间像素的独立选通与强度调制。入射光子经微通道板(Microchannel Plate, MCP)倍增后产生电荷云,由 WSA 阳极进行位置解码并输出电荷脉冲信号。信号处理电路对脉冲进行放大、整形与阈值判别,高速采集卡以事件驱动方式记录每个光子事件的位置与时间信息。上位机图像处理软件通过统计累积模式完成光子计数成像,在保持单光子灵敏度的同时,通过紫外增强 DMD 的时空调制能力有效避免高光强条件下的探测器饱和,实现动态范围扩展。系统支持两种典型工作模式:静态成像模式下,紫外增强 DMD 全开实现常规光子计数成像;编码调制模式下,紫外增强 DMD 加载特定空间编码图案,通过多次测量与解码算法,在保持高灵敏度的同时提升有效空间分辨率并扩展动态范围,满足强信号与弱信号共存的复杂场景探测需求。

3 系统指标测试

单光子计数紫外成像探测系统的性能指标主要包括波长范围、动态范围、暗计数率及耦合光学系统传递函数等,设计了这些关键参数的测试流程、实验条件以及合格判据。

3.1 测试系统搭建

测试系统核心部件由紫外增强 DMD、光子计数成像探测器及光学耦合系统组成,系统实物如图 2 所示。测试光源选用氙灯耦合单色仪,可以输出 $180 \sim 400\,\text{nm}$ 特定波长的光源信号,通过日盲波段光学镜头将目标成像到紫外增强 DMD 上。控制软件采用 LabVIEW 设计,可以控制紫外增强 DMD 图案加载及面阵单光子计数器的成像,并完成数据存储及分析。

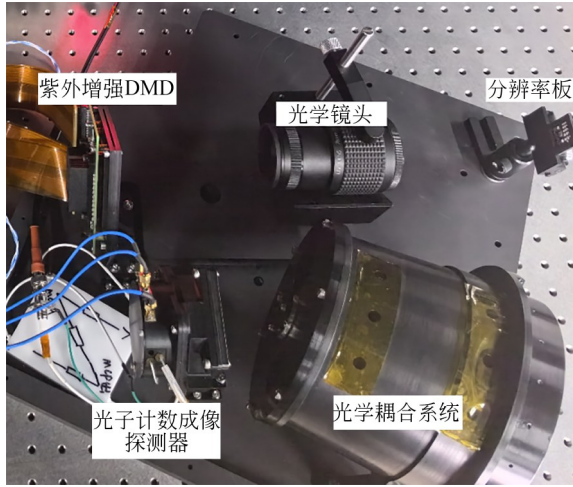


图2 紫外成像探测系统实物

Fig. 2 Photograph of UV imaging detector

3.2 波长范围测试

波长响应范围测试采用单色仪扫描法,在180~320 nm波段内以2 nm为步长测量探测器系统的相对光谱响应。测试使用氙灯耦合单色仪输出单色光,配合NIST溯源标准探测器对入射光通量进行实时监测与校准,确保测试数据可溯源。为验证波段选择性,还进行了离散波长成像测试:利用紫外增强DMD加载十字图案作为空间编码模板,此外在宽谱氙灯光源前分别插入193,254及330 nm的窄带滤光片,仅允许特定波长光通过,探测器采集相应成像数据,以评估系统对不同紫外谱线的实际响应能力。

3.3 动态范围测试

动态范围测试通过两阶段协同评估系统对不同光强信号的适应能力。第一阶段,聚焦紫外增强DMD的空间光调制能力,在200×500微镜阵列显示区域内设置1,1/10,1/100,1/1 000及全关五级占空比梯度,通过高速时序控制微镜阵列状态,同步采集亮场(DMD翻转)与暗背景(DMD全关)的成像数据,基于信噪比分离算法计算各梯度下的有效调制深度,即剔除暗计数与散射光底噪,进而获得紫外增强DMD动态范围调整能力值 Q_1 ,计算公式如下:

$$Q_1 = 20 \lg \frac{(N_{\max} - N_{\text{background}})}{(N_{\min} - N_{\text{background}})}, \quad (1)$$

其中: $N_{\max}$ 为DMD设置占空比为1时,光子计数探测器端对应接收区域的成像计数; $N_{\text{background}}$ 为DMD设置全关时对应接收区域的暗计数与散射

光底噪成像计数; $N_{\min}$ 为DMD设置占空比为1/1 000时对应接收区域的成像计数。

第二阶段,针对面阵单光子计数器本征响应特性,保持紫外增强DMD全开启状态,对比分析中心成像区域与边缘非成像区域的信号强度差异,结合暗计数基底扣除与泊松统计修正,精确提取探测器饱和上限与探测下限,计算本征动态范围 Q_2 ,计算公式如下:

$$Q_2 = 20 \lg \frac{(N_{\text{high}} - N_{\text{dark}})}{(N_{\text{low}} - N_{\text{dark}})}, \quad (2)$$

其中: N_{high} , N_{dark} , N_{low} 分别为强光,暗计数和微光下光子计数探测器每平方厘米每秒所接收的光子数。

系统综合动态范围评定标准为 $Q_1 + Q_2 \geq 160$ dB。该指标确保探测器在悬殊光强场景下同时捕获微弱极光信号与强日冕辐射而不饱和,满足不同探测目标及应用场景对宽动态范围的严苛需求。

3.4 暗计数率测试

暗计数率测试在暗室环境中进行,用于测量探测器在无光条件下的暗噪声水平,需确保无光线照射至感光面,并在室温条件下采集成像数据。通过计算单位时间内有效成像面积内的光子点数量,得出每平方厘米的光子数量。

3.5 耦合光学系统传递函数测试

传递函数表征耦合光学系统对不同空间频率信号的调制传递能力,直接影响探测器空间分辨率。测试分为两步:首先,标定测试面阵单光子计数器的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF),再测量耦合系统总MTF,最后扣除探测器影响获得净光学系统MTF。MTF定义为输出图像对比度与输入靶标对比度之比,如下:

$$MTF = \frac{C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} = \frac{(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})}{(I_{\text{target, max}} - I_{\text{target, min}}) / (I_{\text{target, max}} + I_{\text{target, min}})}, \quad (3)$$

其中: C_{out} 为输出图像对比度, C_{in} 为输入图像对比度, $I_{\max}$ 为成像条纹的峰值灰度, $I_{\min}$ 为成像条纹的谷值灰度, $I_{\text{target, max}}$ 为分辨率靶标条纹的峰值灰度, $I_{\text{target, min}}$ 为分辨率靶标条纹的谷值灰度。

数据处理采用 3σ 准则剔除异常灰度值后,计算峰值均值 $\bar{I}_{\max}$ 及谷值均值 $\bar{I}_{\min}$ 单次 MTF_i 计算

公式如下:

$$MTF_i = \frac{\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{\min}}{\bar{I}_{\max} + \bar{I}_{\min}}. \quad (4)$$

面阵单光子计数器的传递函数测试选用 $60\ \mu\text{m}$ 明暗条纹阵列板作为物面靶标,调整光源、光阑、靶标与面阵单光子计数器之间的相对位置、角度及距离,控制光束发散角至设计值;依次开启和关闭光源,分别采集亮场成像数据与暗场背景数据;对扣除背景后的图像进行判读,确定能够清晰分辨的最小条纹组,依据该极限分辨尺寸计算等效像元尺寸,最后得到面阵单光子计数器的 MTF 值 R_1 。

耦合光学系统测试采用对比度法,将面阵单光子计数器替换为 CMOS 相机(像元尺寸为 $3.76\ \mu\text{m} \times 3.76\ \mu\text{m}$),采用可见光准直光源及靶标采用 USAF 1951 分辨率板,选取 Group 6, Element 3 线对,条纹线宽 $10.8\ \mu\text{m}$ 。

具体测试步骤如下:均匀照明靶标,调节光源强度使测试探测器灰度值处于线性响应区;微调靶标与探测器位置,采集条纹图像,至条纹边缘清晰且灰度分布呈正弦特征;分别采集横向(平行于 DMD 微镜列方向)与纵向(平行于行方向)条纹图像各 3 帧;在条纹图像中心区域选取 5 条剖面线,读取峰值与谷值灰度,计算单次 MTF 值;重复测量 3 次,取平均值作为最终 MTF 值 R_2 。

最后,扣除测试用成像探测器的 MTF 值对耦合光学系统的成像 MTF 值的影响,获得实际

耦合光学系统 MTF 值 R_3 ,其计算方式如下:

$$R_3 = \frac{R_1}{R_2}. \quad (5)$$

4 测量实验与结果

4.1 波长范围测试结果

探测器在 $180\sim 320\ \text{nm}$ 内表现出稳定响应,测试结果如图 3 所示,相对光谱响应曲线平滑,图 4 进一步验证了离散波长下的成像性能:图 4(a)~4(c)分别为 $193, 254, 330\ \text{nm}$ 滤光片下的十字图案成像结果图像清晰,表明探测器有效工作波段完全覆盖目标探测范围,满足日盲探测应用需求。

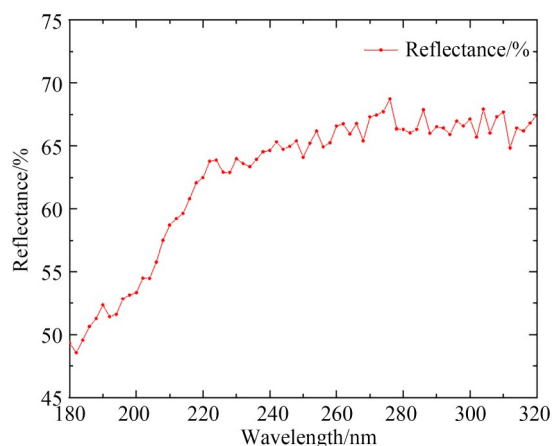
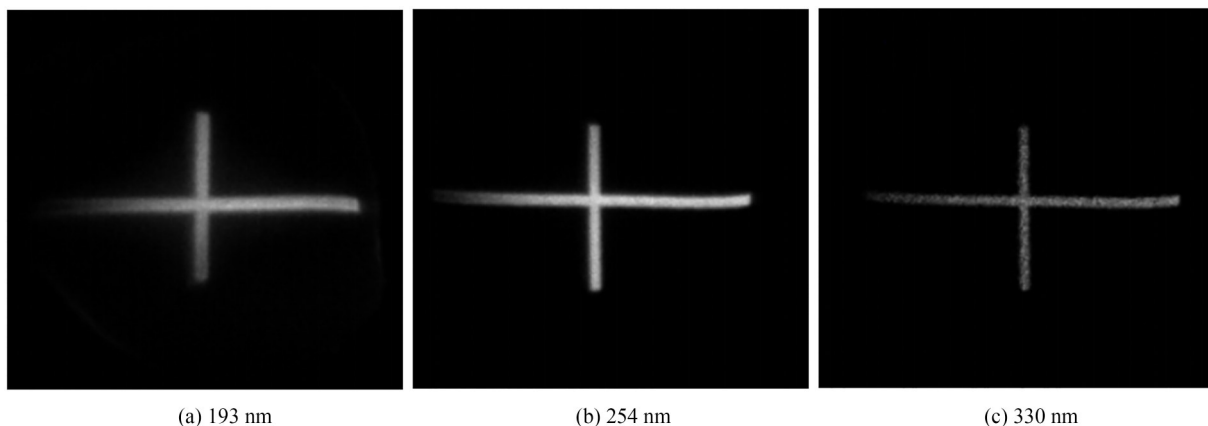


图 3 探测器相对光谱响应曲线

Fig. 3 Relative spectral response curve



(a) 193 nm

(b) 254 nm

(c) 330 nm

图 4 单光子计数紫外成像探测系统波长范围测试结果

Fig. 4 Wavelength range test results of single-photon-counting ultraviolet imaging detection system

4.2 动态范围测试结果

动态范围测试分为紫外增强 DMD 空间调制能力 Q_1 与面阵单光子计数器本征动态范围 Q_2 两个层面,采用分步测量法避免系统饱和。测试数据采集于室温(25 ± 0.5)℃暗箱环境,每个状态重复测量 3 次取均值。

紫外增强 DMD 作为可编程光闸,其调制深度直接影响系统动态范围。测试配置紫外增强 DMD 显示区域为 200×500 微镜阵列,通过控制微镜翻转占空比实现光强衰减。如表 1 与图 5 所示,测试

选取 5 个典型占空比梯度(1,0.1,0.01,0.001 及全关态),积分时间 2 400 s,以降低统计涨落。

表 1 测试数据显示,当占空比从 1 降至 0.001 时,面阵单光子计数器等效像元接收光子数从 1.07×10^5 counts 线性递减至约 109 counts,背景暗计数均值为 35 counts。如图 5 所示,通过控制紫外增强 DMD 显示区域占空比从 1 降至 1/1 000,测得紫外增强 DMD 调制能力 $Q_1=63.18$ dB,线性度优于 99.9%,翻转频率对调制深度影响小于 0.2 dB。

表 1 紫外增强 DMD 调制能力测试数据(积分时间 2 400 s)

Tab. 1 UV-enhanced DMD modulation capability test data (integration time: 2 400 s)

占空比	第 1 次测试/counts	第 2 次测试/counts	第 3 次测试/counts	测试平均值/counts	等效光强比
1(常开)	106 451	106 964	106 873	106 762.7	1
0.1	10 642	10 731	10 685	10 686	10^{-1}
0.01	1 068	1 075	1 072	1 071.7	10^{-2}
0.001	108	111	109	109.3	10^{-3}
0(全关)	37	35	36	35.3	0

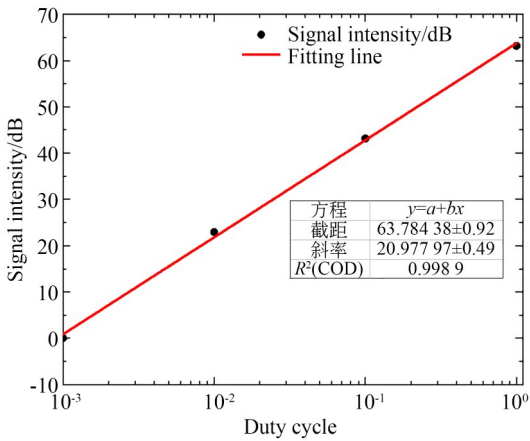


图 5 紫外增强 DMD 调制能力曲线

Fig. 5 UV-enhanced DMD modulation capability curve

MCP 本征动态范围表征探测器在不饱和条件下对强弱信号的响应能力。测试固定紫外增强 DMD 为全开态,调节入射光强,测试结果如表 2 所示。在强光模式下,等效像元接收光子数达 5.09×10^4 counts/s·cm²,接近 MCP 线性区上限;在微光模式下,光子数降至 0.95 counts/s·cm²,仍高于暗计数基底 0.47 counts/s·cm²。本征动态范围计算 $Q_2=100.7$ dB。

表 2 MCP 动态范围测试数据(积分时间 100 s)

Tab. 2 MCP dynamic range test data (integration time: 100 s)

模式/方式	第 1 次测试/counts/s·cm ²	第 2 次测试/counts/s·cm ²	第 3 次测试/counts/s·cm ²	平均值/counts/s·cm ²
强光	50403	51402	51017	50940.67
成像	0.945	0.953	0.943	0.947
微光	0.473	0.487	0.450	0.470
暗计数				

系统综合动态范围为 163.9 dB,实测数据显示,在最高光强(饱和前)与最低可探测信号(信噪比=1)之间跨度达 1.02×10^8 倍。

4.3 暗计数率测试结果

暗计数率测试在光学暗箱中进行,在 25℃室温条件下,采用连续采集模式记录暗场事件数据,积分时间设置为 100 s 以增强统计可信度,重复测量 3 次以评估时间稳定性。探测器有效成像面积内的平均暗计数率为 0.481 cps/cm²,未发现固定热点噪声或异常亮像素,表明面阵单光子计数器制备工艺稳定,场致发射噪声控制良好。

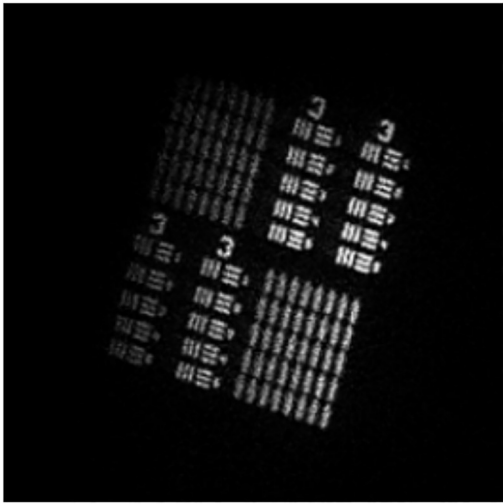
4.4 耦合光学系统传递函数测试结果

MTF 测试结果如表 3 与图 6 所示。面阵单光子计数器横向 MTF 3 次测量值为 0.534, 0.521, 0.516, 平均值为 0.523 7; 纵向 MTF 为 0.519, 0.528, 0.521, 平均值为 0.522 7; 横纵方向差异 <0.5%。耦合光学系统横向 MTF 3 次测量值为 0.645, 0.658, 0.655, 平均值为 0.652 7; 纵向 MTF 为 0.625, 0.653, 0.651, 平均值为

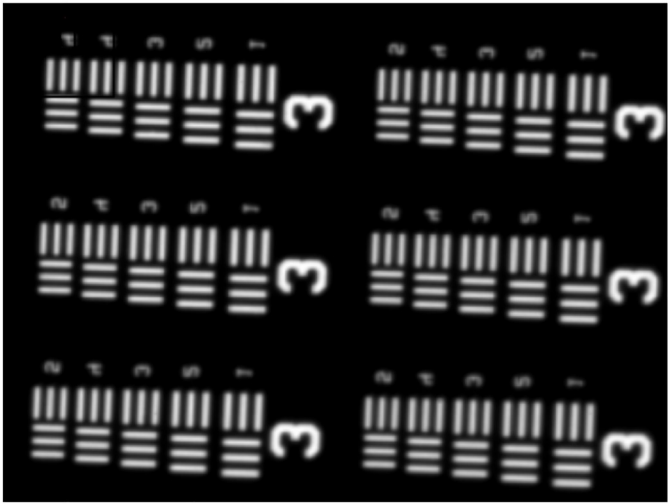
0.643, 横纵方向差异 <2%; 横纵方向差异小表明系统各向同性良好, 无明显像散。综合测试结果表明, 耦合光学系统在奈奎斯特频率处传递函数 >0.6, 满足紫外成像探测系统的空间分辨率要求, 由于原有面阵单光子计数器等效像元分辨率约为 $60\text{ }\mu\text{m}\times 60\text{ }\mu\text{m}$, 本系统通过调制 $10.8\text{ }\mu\text{m}\times 10.8\text{ }\mu\text{m}$ DMD 单元, 有效提升了高频细节分辨能力。

表 3 耦合光学系统的 MTF 测试结果
Tab. 3 MTF test results of coupled optical system

分辨率靶标 方向	测试次数	耦合光学系统峰 值均值/DN	耦合光学系统 谷值均值/DN	耦合光学系统 MTF 值	面阵单光子计 数器 MTF 值	最终系统的 MTF
横向	1	63 140	6 087	0.824	0.534	0.645
	2	60 497	7 033	0.792	0.521	0.658
	3	60 376	7 171.5	0.788	0.516	0.655
纵向	1	60 705.3	5 604.0	0.831	0.519	0.625
	2	59 902.7	6 323.5	0.809	0.528	0.653
	3	58 364.0	6 451.5	0.801	0.521	0.651



(a) 面阵单光子计数器
(a) Array single-photon counting detector



(b) 耦合光学系统
(b) Coupled optical system

图 6 不同光学系统的 MTF 成像测试结果

Fig. 6 MTF imaging test results of different optical systems

4.5 综合性能评估

与原有面阵单光子计数器相比, 本文研制的紫外成像探测系统在 180~320 nm 波段实现了 0.481 cps/cm² 的暗计数率与 163.9 dB 的动态范围。本系统在保持同等暗噪声水平的前提下, 通

过紫外增强 DMD 空间光调制使动态范围提升约 60 dB, 且成像像元尺寸从约 $60\text{ }\mu\text{m}\times 60\text{ }\mu\text{m}$ 缩小至 $10.8\text{ }\mu\text{m}\times 10.8\text{ }\mu\text{m}$, 具备单像元级别的空间光调制能力。测试结果表明, 单光子计数面阵探测系统相关功能性能满足系统设计要求。

5 结 论

本文将紫外增强DMD与面阵单光子计数器进行光学耦合,采用全反射光学系统实现微镜阵列与等效像元的高精度匹配,研制出具备单光子计数能力的高灵敏度紫外成像探测系统。其工作波段为180~320 nm,暗计数率为0.481 cps/cm²,综合动态范围为163.9 dB,MTF $\geq$ 0.6,指标满足设计要求。该探测器兼具单光子灵敏度与快速空间编码优势,满足空间天气监测、紫外预警侦查等应用领域对高灵敏度、大动态范围及高空空间分辨率的综合需求,为紫外高灵敏度成像探测及应用领域提供了关键技术支撑。未来,通过进一步优化系统可以实现对深紫外、近红外等波段

响应能力实现对地球极光卵等光谱目标进行高灵敏度成像探测。

作者贡献声明:

郭乃菲:方法提出,论文构思和撰写;

孙亮:实验设计及数据整理和分析;

何玲平:设计方案及测试方法论证;

马天奇:光学系统结构设计及系统装调测试;

陶琛:资源提供,方案论证;

王玮:器件及控制器研制及耦合方案对接;

闫万红:成像系统研制,测试平台搭建,数据分析及论文编辑。

参考文献:

- [1] 吴礼刚,何文荣,胡晋荪,等. 日盲紫外-可见光双光谱照相机系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1529-1535.
WU L G, HE W R, HU J S, *et al.*. Solar blind UV and visible dual-spectral camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1529-1535. (in Chinese)
- [2] 陈塑淇,吕博,刘伟奇,等. 用于电晕检测的日盲紫外成像系统设计[J]. 光子学报, 2022, 51(9): 363-372.
CHEN SH H, LÜ B, LIU W Q, *et al.*. Design of a solar-blind ultraviolet imaging system for corona detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(9): 363-372. (in Chinese)
- [3] 常振,王煜,司福祺,等. 基于科学级CCD的紫外成像系统设计与实现[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 183-191.
CHANG Z, WANG Y, SI F Q, *et al.*. Design and implementation of ultraviolet imaging system based on scientific grade CCD[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 183-191. (in Chinese)
- [4] 王煜,陆亦怀,周海金,等. 星载高动态范围差分吸收成像光谱仪成像电路设计及实现[J]. 光学精密工程, 2024, 32(13): 2017-2028.
WANG Y, LU Y H, ZHOU H J, *et al.*. Design and implementation of imaging circuit for satellite-borne high dynamic range differential optical absorption spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(13): 2017-2028. (in Chinese)
- [5] 罗磊,唐利斌,左文彬. 紫外增强图像传感器的研究进展[J]. 红外技术, 2021, 43(11): 1023-1033.
LUO L, TANG L B, ZUO W B. Research progress in ultraviolet enhanced image sensors[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(11): 1023-1033. (in Chinese)
- [6] 饶志敏,李一成,毛建东,等. 增强型光电耦合与多阳极光电倍增管探测器在生物气溶胶荧光光谱激光雷达中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(4): 1088-1095.
RAO ZH M, LI Y C, MAO J D, *et al.*. Application of enhanced photoelectric coupling and multi anode photoelectric multiplier tube detectors in biological aerosol fluorescence spectrum lidar[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2025, 45(4): 1088-1095. (in Chinese)
- [7] RAO Z M, LI Y C, MAO J D, *et al.*. Application of enhanced photoelectric coupling and multi anode photoelectric multiplier tube detectors in biological aerosol fluorescence spectrum lidar [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2025, 45(4): 1088. (in Chinese)
- [8] 陈波,何飞. 月基地球等离子体层极紫外成像仪的光学设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2057-2062.
CHEN B, HE F. Optical design of moon-based earth's plasmaspheric extreme ultraviolet imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2057-2062. (in Chinese)
- [9] ZHANG X X, CHEN B, HE F, *et al.*. Wide-field

- auroral imager onboard the Fengyun satellite [J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 47.
- [10] JIANG Z Z, NI Q L. Design and performance of photon imaging detector based on cross-strip anode with charge induction[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(17): 8471.
- [11] HAN Z W, SONG K F, ZHANG H J, *et al.* Photon counting imaging with low noise and a wide dynamic range for aurora observations [J]. *Sensors*, 2020, 20(20): 5958.
- [12] LI Y, SHENG L Z, LIU Y A, *et al.* Image distortion correction based on partial polynomial model for a large-array photon-counting detector [J]. *Optical Review*, 2025, 32(1): 111-119.
- [13] FENG W, ZHANG F M, WANG W J, *et al.* Digital micromirror device camera with per-pixel coded exposure for high dynamic range imaging [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3831-3840.
- [14] YE J T, YU C, LI W W, *et al.* Ultraviolet photon-counting single-pixel imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(2): 024005.
- [15] ZHAO S J, YIN Z Y, YU S B, *et al.* Block-based compressive imaging with a swin transformer [J]. *Optics Express*, 2025, 33(5): 9587-9603.

作者简介:



郭乃菲(1995—),女,吉林长春人,硕士,2021年于德国慕尼黑大学获得硕士学位,主要从事光学检测技术及应用的研究。E-mail: guonaifei@ciomp.ac.cn

通讯作者:



闫万红(1994—),男,吉林四平人,博士研究生,助理研究员,2016年、2019年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,主要从事单光子计数成像探测器前端电子学及图像处理算法等研究。E-mail:18844189973@163.com