DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311275

基于 MCP/sCMOS 的单光子成像探测系统及算法研究*

周一乐,娄小平,杜中伟,牟涛涛

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192)

摘 要:针对单光子计数成像技术探测目标信号微弱信噪比低、所得图像目标区域不清楚、背景噪声严重等问题。本文利用 270±5 nm 的日盲紫外滤光片、图像增益710⁵ 的微通道板像增强器(MCP)、荧光屏和最大分辨率为1504×1504 的科学级互补金属 氧化物半导体(sCMOS)等器件,设计了日盲紫外单光子探测系统,并通过时序控制获取了单光子光斑图像。为了突出图像中的目 标区域,本文利用改进的形态学高帽变换算法,对光斑目标区域进行增强处理;随后利用三角阈值法对图像进行二值化处理,同时 利用连通域对目标区域的坐标进行提取;最后运用区域极值算法在原图中的目标区域进行单光子计数。对紫外光源进行了单次 曝光时间为 80~100 ns 的系列成像和数据处理实验,实验结果验证了所设计的单光子成像探测系统和光子计数算法的可行性。 关键词:单光子计数;图像增强;目标提取

中图分类号: TH744 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.2

Research on single-photon imaging detection system and algorithms based on MCP/sCMOS

Zhou Yile, Lou Xiaoping, Du Zhongwei, Mu Taotao

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: For single photon counting imaging technology to detect weak target signal, low signal-to-noise ratio, and unclear target area of the obtained image, serious background noise and other problems, a single-photon detection system based on solar-blind ultraviolet is designed by using 270 ± 5 nm solar-bind UV filter, microchannel plate image intensifiers (MCP) with image gain >10⁵ and scientific-grade complementary metal oxide semiconductors (sCMOS) with a mazimum resolution of 1 504×1 504. The system uses time sequence control to obtain single-photon spot images. To highlight the target area in the image, the improved morphological top-hat transformation algorithm is used to enhance the spot target area. Then, the image is binarized by the triangular threshold method, and the coordinates of the target area are extracted by using the connected domain. Finally, the area extremum algorithm is used to count single photons in the target area of the original image. The article conducts a series of imaging with a single exposure time of 80~100 ns and data processing experiments on ultraviolet light sources. The results show the feasibility of the designed single-photon imaging detection system and photon counting algorithm.

Keywords: single photon counting; image enhancement; target extraction

0 引 言

单光子计数成像是一种微光成像技术,其图像主要目标区域由单个或多个光子组合而成,在检测过程 中通过使用位置敏感器件将光子的位置记录下来,并 对光子进行成像及计数分析^[1-2]。该技术在诸多领域 有着广泛的应用,包括天文学、荧光显微镜和光谱学、 生物发光研究、DNA 测序、激光雷达、紫外光子探测、大 气测污等^[38]。

目前已有多种检测器件用于光子计数成像探测,例 如光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)、电子倍增电 荷耦合器件(electron multiplying charge-coupled device, EMCCD)、增强型电荷耦合器件(intensified charge

收稿日期:2023-04-06 Received Date: 2023-04-06

^{*}基金项目:北京市属高校教师队伍建设支持计划(BPHR202203230)项目资助

coupled device, ICCD)、单光子雪崩二极管(single photon avalanche diode, SPAD) 阵列和互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 等^[9]。 其中,PMT 是传统的光子计数探测器件,经典的时间相 关单光子计数(time-correlated single photon counting, TCSPC)技术就是利用 PMT 记录光子到达时间,从而构 建基于检测时间的光子分布特性[10]。但它具有一定的 缺点,包括独立"像素"(即空间分辨率)数量有限、整体 尺寸大、工作所需电压高等[11-12]。近年来,随着材料领域 的快速发展,基于微通道板像增强器和 CCD、CMOS 等图 像传感器件相结合的探测方式逐渐兴起。已经商业化的 ICCD 就是将 MCP 与 CCD 器件集成在一个封装里。 ICCD 和 EMCCD 都是阵列探测器,但它们的像素容易饱 和,空间分辨率有限^[13-16]。SPAD 阵列具有皮秒级的快 速响应能力,但由于工艺限制,其像素尺寸相对较大,导 致空间分辨率较低。与 SPAD 阵列相比, CMOS 虽然响 应能力没有那么快,但视野更广,能够提供更好的空间分 辨率[17]。

基于 MCP 和图像传感器件的光子计数成像系统,在 探测到光子信号后,还需要利用软件算法,对图像进行光 子计数分析。传统的计数算法有质心法^[2]、连通域标记 法等。Castro 等^[18]开发了基于 MCP-CMOS 结构的光子 计数探测器性能模拟器,使用 5-square 质心算法作为光 子计数算法。但质心算法的准确率还有待提高。

Wang 等^[9]利用基于 Te-Cs 阴极双 MCP 紫外像增强器和 NSC1105 型 CMOS 的光子计数系统,提出了基于目标区域极大值的时间分辨光子计数算法。他们在荧光屏上的光斑从出现到消失的一个脉冲周期内连续采样,通过连续几帧图像相同区域极大值的对比进行光子计数统计。上述方式对光子信号和噪声信号只进行了简单的滤波处理,图像信噪比较低;同时,该方法利用荧光屏的余晖时间对 MCP 的输出图像进行高速采样,对 CMOS 的帧率要求较高,为了得到高帧率,只能降低像素分辨率^[9,19]。

本文基于 MCP 和 sCMOS 相结合的方式构建单光子 计数成像系统,使用数学形态学方法对获取的图像进行 目标增强,然后利用连通域标记算法对目标区域进行提 取,最后在原图上的目标区域通过局部极大值方法实现 光子计数。

1 基于 MCP/sCMOS 的单光子计数成像系统

本文的探测目标是紫外波段的微弱信号。所采用的 单光子探测成像系统主要由窄带滤光片、光电阴极、MCP 像增强器、荧光屏、耦合透镜、科学级 CMOS(sCMOS)构成,如图1所示。



Fig. 1 Single photon imaging system based on MCP/sCMOS

在进行单光子探测时,窄带滤光片首先对光信号进行滤波处理,只保留需求波段的信号。本文的探测目标 在日盲紫外(200~280 nm)波段有明显的特征谱线,经实 验分析,最终选择的特征谱线为 270 nm。实验系统使用 270±5 nm 的窄带滤光片,截止带透过率为 OD6。

经过窄带滤波的光信号,通过光电阴极后,在光电效应作用下,光子按照一定的量子效率转化成光电子。光电子在经过微通道板(microchannel plate, MCP)像增强器时产生二次电子,实现了信号放大。当目标信号低于 3×10⁻¹⁵ W/cm²时,信号从连续的光波转变为不连续的光子,所以进行单光子探测时,对像增强器的放大倍率要求较高。论文实验系统采用型号为 EyeiTS-D 的两级结构 MCP,图像增益>10⁵,分辨率为 30~45 LP/mm;光电阴极采用 S-20,敏感光谱峰值为 250 nm,光谱峰值处的量子效率为 20%。

单个光电子经过 MCP 放大后形成电子云,轰击到后 续的荧光屏上,荧光屏将电子信号转变为光信号。由于 目标信号十分微弱,在光电阴极量子效率的影响下,MCP 的每个通道只有一个或没有光电子进入,从而在荧光屏 上形成一个个光斑。荧光屏发出的荧光信号经光纤锥或 透镜耦合后,被图像传感器采集并输出图像。论文所用 的实验系统采用透镜耦合方式。相较于 EMCCD,sCOMS 有更高的分辨率和更宽的动态范围,价格也相对较低。 另外,sCMOS 也没有 EMCCD 普遍存在的芯片老化问题。 基于上述因素考虑,论文实验系统采用德国 PCO 公司的 sCMOS 器件,其最大分辨率为1 504×1 504,像素尺寸 6.5 μm×6.5 μm,动态范围 27 200:1。

本文设计的单光子成像探测系统采用的紫外镜头焦距为 85 mm,接口为 F口,F/NO2.8。系统实物图如图 2 所示。



图 2 单光子成像探测系统示意图 Fig. 2 Diagram of the single photon imaging detection system

基于 MCP/sCMOS 的单光子探测成像系统整体时序 如图 3 所示。在 MCP 和 sCMOS 开启后,系统持续采集 信号;sCMOS 关闭后,系统输出采集到的图像。在输出图 像时,系统不进行信号采集。图 3 中,标识为 1 的位置所 示为当荧光屏正在显示一个光子时,另一个光电子也轰 击到荧光屏上时的情况。



最后,计算机对 sCMOS 所采集到的图像进行相应处理,利用本文后续介绍的算法进行光子计数。

2 光子计数算法

2.1 目标增强

由于一部分噪声和目标区域的灰度值相近,在计算 得到的二值化阈值后,若直接进行二值化处理,则处理后 图像仍会出现部分噪点,对后续光子计数结果产生影响。 因此,在对图像进行二值化处理之前,需要对图像中的目 标区域进行增强处理。本文采用一种改进的基于数学形 态学方法的高帽变换对目标进行增强。

结构元素是进行数学形态学分析的基础,结构元 素是一个比原始图像小具有一定形状的集合。通过结 构元素在原始图像内平移,同时与原始图像进行相关 运算,达到对原始图像进行分析的目的。设原始图像 坐标点为f(x,y),结构元素坐标点用B(u,v)表示,f和 B的定义域分别为**D**_f和**D**_b。数学形态学的基本运算 过程如下:

1)膨胀

$$(f \oplus B)(x,y) = \max_{u,v} \{f(x,y) + B(u,v) \mid (a,b) \in \mathbf{D}_{f}, (u,v) \in \mathbf{D}_{B}\}$$
(1)
2)腐蚀

$$(f \Theta B)(x,y) = \min_{u,v} \{f(c,d) - B(u,v) \mid (c,d) \in \mathbf{D}_{f}, (u,v) \in \mathbf{D}_{B}\}$$
(2)
3)开运算

$$(f \circ B)(x,y) = (f \Theta B) \oplus B$$
(3)
4)闭运算

$$(f \cdot B)(x,y) = (f \oplus B) \Theta B$$
(4)

其中,
$$a = x - u$$
, $b = y - u$, $c = x + u$, $d = y + v_{\circ}$

在传统高帽算法中,利用 Top-hat 变换和 Bot-hat 变 换进行明亮和暗淡目标区域处理。其定义如下:

$$TH(x,y) = f(x,y) - (f \circ B)(x,y)$$
(5)

 $BH(x,y) = (f \cdot B)(x,y) - f(x,y)$ (6)

开运算是先做腐蚀运算再做膨胀运算,能够去除 较小的明亮细节,改变目标区域的灰度值,而相对较 暗的部分不受影响。当图像经过开运算操作后,可以 通过对比区域灰度值前后变化来确定目标区域。若 引入一个判断阈值,则能更加准确地判断出潜在的目 标区域。

假设图像经过开运算后,每个像素灰度值的变化为 TH,判断阈值为 J。若 J < TH,则代表其对应的点属于 目标区域。

本文利用如下过程计算判断阈值:

1)选取一个大小为 $L \times L$ 的窗口 W,W 的中心位于 f(x,y)的每个像素处;

2) 找到窗口 W 中像素灰度的最大值 W_{max} 和最小值
 W_{min};

3) 计算每个窗口中 W_{max} 和 W_{min} 的差值,并根据差值 形成一幅新的图像,表示为 GCM;

 4)利用 GCM 的平均值 mean_{GCM} 和标准差 σ_{GCM},并加 入调整参量 δ,即可得到如式(7) 所表示的判断阈值 J。

 $J = mean_{GCM} + \delta \times \sigma_{mean}$ (7) 式中: δ 可根据目标灰度来选择,通常有δ ∈ [0,10]。若 目标区域灰度值较小,则δ为较小值;否则,δ为较大 值^[20]。因此,改进的 Top-hat 变换(morphological top-hat transform, MTH)如下所示:

 $MTH(x,y) = \max(f(x,y) - f \circ B(x,y), J) - J (8)$

图像 GCM 由背景噪声、目标区域、目标区域边缘3 部 分组成。其中,背景噪声和目标区域,在各自区域内灰度 值变化较小,所以 GCM 相对较小;同时,由于目标区域与 周围背景噪声相比,灰度值变化较大,因此在目标区域与 周围背景噪声相比,灰度值变化较大,因此在目标区域的 边缘处,GCM 值较大;背景噪声区域所占像素多,目标区 域所占像素少,背景区域的 GCM 小于阈值 J,而背景杂波 受开运算影响较小,背景杂波区域经过开运算后的 TH 要 小于 GCM,所以背景杂波区域的 TH 小于阈值 J,即 f(x,y) - f • B(x,y) 小于 J。

根据以上分析,由式(8)可知,背景杂波区域经过改进 后的 Top-hat 变换后,数值为 0,从而背景杂波被抑制。另 外,目标区域是较小的明亮细节,经过开运算后被去除,所 以目标区域经过开运算后灰度值变化较大,*TH* 大于大部 分 *GCM*,同时也大于阈值 *J*,即*f*(*x*,*y*) -*f* ∘ *B*(*x*,*y*) 大于 *J*。根据式(8)所示,经过 Top-hat 变换后,目标区域的值 大于 0,从而目标区域被保留。因此,通过 *GCM* 计算得到 的判断阈值 *J* 是一个合理值,同时改进的高帽算法可以 利用 *J* 来判断潜在的目标区域。 同理,可求得改进的 Bot-hat 变换(morphological bot-hat, MBH),如下所示:

MBH(*x*,*y*) = max(*f* ⋅ *B*(*x*,*y*) − *f*(*x*,*y*),*J*) − *J*(9) 由此,根据 *MTH* 可找出潜在的目标区域,根据 *MBH* 可找出潜在的噪声区域。因此,目标增强算法可以被定 义如下,

 $f_{En}(x,y) = \alpha \times f(x,y) + \beta \times MTH(x,y) - \eta \times MBH(x,y)$ (10) 式中: $\alpha, \beta \pi \eta$ 为加权系数,其中 0 $\leq \alpha \leq 1, \beta \geq 1$ 并且 $\eta \geq 1$ 。由式(10)可得,当 α 越小, β 越大, η 越大时, f_{En} 中目标区域灰度值越大,背景噪声的灰度值越小,最终 使得目标区域得到强化。在本文采用的算法中,目标区

域和背景区域的对比度将得到很大程度的增强,同时潜

在目标区域的灰度值也会大幅度地增强^[20]。

2.2 目标连通区域提取

增强处理改变了目标区域的灰度值,直接对增强后 的图像使用计数算法会产生计数误差,所以需要在原图 中对应的目标区域进行光子计数。同时,目标增强算法 只是使得目标区域和噪声之间的差距增大,并未去除噪 声,后续的算法处理,仍会受到噪声的影响,因此,需要在 原图上进行目标区域提取。

首先计算图像的灰度直方图,并对灰度直方图的高 度和动态范围进行归一化处理,在此基础上确定图像的 全局阈值(threshold,THR)。根据图 4 所示的光子图像 的灰度直方图分布特性,本文采用如图 5 所示的三角阈 值法进行阈值计算。



Fig. 4 Grayscale histogram

如图 5 所示灰度直方图,连接峰值点 A(maxdix, max),与点 B(255,0)。

由点A、B可以得到线段AB所在的直线方程为: ax + by + c = 0,其中 $a = \max, b = 255$ -maxdix,c = -255max。结合点到直线的距离公式:

$$d = \left| \frac{ax_0 + by_0 + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right|$$
(11)





可求得直方图上任一点(x₀,y₀)到直线 AB 的距离。计算得到直方图曲线上距离直线 AB 最远的点,该点 所对应的横坐标 x_{THR}即为所求的二值化阈值 THR^[21]。

经过二值化处理后,图像中的背景灰度值为0,光子 呈现出一个个光斑;在利用光子计数算法进行计数前,需 要利用连通域算法对目标区域坐标进行提取。本文采用 八邻域的种子填充算法进行目标区域提取。如图6所示 为八邻域连通示意图。



图 6 八连通域 Fig. 6 Eight connected domains

种子填充法实现方法如下:

1) 扫描图像,直到当前像素为目标像素。

(1)将该像素点作为目标像素,并对其进行标记,同时对该点邻域的目标像素进行标记;

(2)以邻域的目标像素为种子点,继续进行扫描;

(3)重复步骤(2),直至没有邻域存在目标像素点;

2)重复1)中的步骤,已经标记过的像素不再重复标记,直至扫描结束。扫描结束后,就可得到图像中所有目标区域的连通域^[22]。

2.3 目标区域计数

信号源所发出的光子数十分稀少,但是在光子密集 区域,仍旧会出现光子所对应的光斑重合的情况。若直 接用连通域的数量来表示光子数,则会使重合光子计数 为一个光子,使测量结果出现误差。由于光电子的衍射 特性,光电子轰击到荧光屏上时,不会呈现理想中的单个 点,而是会向周围发散形成一个一个的光斑。所以在目 标区域内光斑中心的灰度值最大,然后向周围递减,如 图 7(a)所示。因此,基于三维空间的光子计数算法就是 在二维标记的基础上引入灰度极值,通过判断一块连通 域出现几次灰度极值来区分有几个光子。图像上呈现出 一个个弥散光斑,从三维立体的角度来看,光斑可近似成 图 7(b)所示。



利用光斑的三维特征,可以通过寻求灰度值的局部 极大值来确定光子。设每个像素在图像中的坐标为 (*x*,*y*),加入每个像素点所对应的灰度值为*z*,则每个像素 点与灰度值所对应的关系设为*z* = *f*(*x*,*y*)。由于图像中 的像素是离散的,所以像素点在*x* 轴方向的一维导数 如下:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f'(x) = f(x+1) - f(x) \tag{12}$$

则二阶微分为:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x} = \frac{\partial' f(x)}{\partial^2 x} = f'(x+1) - f'(x)$$
(13)

由式(12)、(13)可得: $\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x} = f'(x+1) - f'(x) = f(x+2) - 2f(x+1) + f(x)$ (14)

整理可得: $\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x} = f(x+1) + f(x-1) - 2f(x)$ (15)

由此可知,对于点 (x,y),其在 x 轴方向 y 轴方向 (5 x) 轴 x 轴 x 45° 夹角方向 (5 x) 轴 x 135° 夹角方向的二阶导数分别为:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 y} = f(x+1,y) + f(x-1,y) - 2f(x,y)$$
(16)

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 y} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y)$$
(17)

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x_{45}} = f(x+1,y-1) + f(x-1,y+1) - 2f(x,y)$$

(18)

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x_{135}} = f(x - 1, y - 1) + f(x + 1, y + 1) - 2f(x, y)$$
(19)

根据极大值点的性质,当上述4个方向的二阶导数 值均小于0时,可判定该点为极大值,以此来确定一个 光子^[23]。

3 实验验证

3.1 目标区域增强提取验证及分析

为了验证目标增强提取算法的可行性,本文利用 单光子探测系统对紫外光源拍照所得图像进行验证。

如图 8 所示,图 8(a)为原始图像,图 8(b)为原始 图像灰度图,图 8(c)为利用三角阈值法直接进行二 值化后的图像,图 8(d)为目标区域增强后的图像,图 8(e)为目标增强后、未进行二值化处理的三维灰度 图,图 8(f)为经过目标区域增强和二值化处理后的 三维灰度图。



Fig. 8 Contrast before and after target area enhancement

249

由图 8 中(c)、(e)可以看出:只经过二值化处理或 目标增强处理,并不能完全去除噪声的影响。原始图像 经过目标增强后,背景噪声得到了很好的抑制,但并未完 全消除。利用由原始图像得到的阈值进行二值化处理 后,可以很好地滤除目标区域外的所有噪声。通过对比 分析,证实了算法的合理性。

3.2 目标区域计数算法实验验证及分析

利用经过目标增强和提取所得到的目标区域的坐标值,在原始图像上进行计数算法的验证。表1所示为在紫外光源不同光照条件下,利用本文算法得到的光子数。

表1 不同光照下光子计数实验结果

Table 1 Experimental results of photon counting under different light conditions

强光照光子个数	中光照光子个数	弱光照光子个数
62	20	11
76	10	5
76	19	2
71	22	8
50	17	3
62	22	6

由表1可以看出,在紫外光源不同的光照条件下,光 子数差距十分明显,且在相同光照条件下,光子数变化范 围不大,初步验证了系统算法的可行性。

表 2 所示为连通域算法、增强提取后图像区域极值 算法、原图区域极值算法 3 种算法在强中弱 3 种光照条 件下的光子计数实验结果。

表 2 不同光照下不同算法光子计数实验结果 Table 2 Experimental results of photon counting with different algorithms under different illumination

	光子个数		
光照强度	连通域	增强提取后图像 区域极值算法	原图区域 极值算法
强光照	47	50	63
中光照	27	28	31
弱光照	8	8	8

由表2可知,当信号源光照越弱时,3种算法结果越 接近。这是由于信号源光照弱,重叠光子越少,所以导致 结果越接近。进行目标区域增强提取后,其光子数在连 通域和原图区域极值中间,这是由于进行了目标增强后, 部分重合黏连光子区域,灰度值被增强到最大,导致多个 光子所在区域灰度值相同,无法求得极值,所以光子数与 原图区域极值所得光子数相比,会更少;而增强提取后图 像的部分光子区域,仍旧保留区域极值的特性,所以相对 于连通域算法,所得光子数更多。综上所述,在原图目标 区域利用计数算法,所得光子数更加接近真实值。

3.3 光子计数概率分布验证

探测实验中,在足够小的时间间隔内,发生光电事件 只有"是"和"否"两种情况,所以发生一次光电事件的概 率服从(0-1)分布^[24]。那么发生一次光电事件的概率 (即探测到一个光子的概率)与入射光的强度和时间间 隔 Δt 成正比,即:

$$P(1,\Delta t) = \alpha I \Delta t \tag{20}$$

其中,*I*表示入射光强,α表示比例系数,和探测器的 量子效率相关。那么不发生光电事件的概率(即探测不 到光子的概率)就可以表示为:

$$P(0,\Delta t) = 1 - \alpha I \Delta t \tag{21}$$

将时间 T 微分成 N 个足够小的时间间隔 Δt ,则有 $N=T/\Delta t$ 。假设发生在不重叠的时间间隔 Δt 内的光电事 件是相互独立的随机事件,由于 Δt 足够小,在 Δt 范围内 探测到两个光子的概率即为 0。根据概率分布先验公式 可以推导出,在时间 T 内,将发生一次光电事件独立进行 N 次,相当于 N 次贝努利实验,那么随机变量 A 发生 k 次 的光子计数事件(即探测到 k 个光子的概率)就服从以 N和 NP 为参数的二项分布。

$$P_{\Lambda}(k) = \binom{N}{k} (\alpha IT)^{k} (1 - \alpha IT)^{N-k}$$
(22)

根据泊松定理,当 $N \rightarrow \infty$ 时,随机变量 Λ 服从参数为 α *IT* 的泊松分布。

$$\lim_{n \to \infty} P_{\Lambda}(k) = \frac{(\alpha IT)^{k}}{k!} e^{-\alpha IT}$$
(23)

因此,当光强恒定时,在一定时间*T*内,探测器探测 到*k*个光子的概率服从参数为*αIT*的泊松分布。若考虑 入射光强是随时间变化的函数,记为I(t),则式(23)中 的 $I = \int_{t}^{t+T} I(t) dt$ 就称为入射光强在时间I(t)内的积分 强度^[25]。

本文在不同光照条件下分别采集两百幅图像,利用 本文算法对采集到的图像进行光子计数分析,并利用 MATLAB进行了概率分布拟合,得到的光子数概率分布 曲线如图 9 所示,可以发现所得光子数基本符合泊松 分布。



Fig. 9 Fitting of photon number poisson distribution

4 结 论

本文提出了一种基于 MCP/sCMOS 相结合的单光子 探测系统,通过成像方式实现了日盲紫外波段的单光子 探测计数。使用 270 nm 日盲紫外滤光片对信号源进行 滤波处理后,两级 MCP 所产生的高增益使极微弱的信号 得到了有效放大,从而使 MCP 输出信号轰击荧光屏后, 其余晖效应保证了能够在耦合透镜后端的 sCMOS 传感 器上获得较高质量的单光子光斑图像。随后通过对所得 图像进行目标增强处理,提取目标区域,求目标区域极 值,在原图区域进行光子计数等步骤,实现了单光子计数 的目的。论文通过对紫外光源进行单次 80~100 ns 的成 像实验,并通过不同图像处理算法的对比,验证了所提出 方法的可行性。同时,通过对光子态的分析,证明了光子 数的概率满足泊松分布。

参考文献

- [1] HIRVONEN L M, SUHLING K. Photon counting imaging with an electron-bombarded pixel image sensor [J]. Sensors, 2016, 16(5): 617.
- [2] HIRVONEN L M, BARBER M J, SUHLING K. Photon counting imaging and centroiding with an electronbombarded CCD using single molecule localisation software [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 820: 121-125.
- [3] SEITZ P, THEUWISSEN A J P. Single-photon imaging[M]. Springer Science & Business Media, 2011.
- [4] BULLER G S, COLLINS R J. Single-photon generation and detection [J]. Measurement Science and Technology,

2009, 21(1): 012002.

- [5] EISAMAN M D, FAN J, MIGDALL A, et al. Invited review article: Single-photon sources and detectors [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(7): 071101.
- [6] POSTMA J, HUTCHINGS J B, LEAHY D. Calibration and performance of the photon-counting detectors for the ultraviolet imaging telescope (UVIT) of the astrosat observatory[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2011, 123(905): 833-843.
- [7] ROMING P W A, KENNEDY T E, MASON K O, et al. The Swift ultra-violet/optical telescope [J]. Space Science Reviews, 2005, 120: 95-142.
- [8] 朱勇,欧阳俊. 单光子计数系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报,2007,(S1):28-30.
 ZHU Y, OUYANG J. Design and realization of single photon counting system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, (S1):28-30.
- [9] WANG Y, QIAN Y SH, KONG X Y. Photon counting based on solar-blind ultraviolet intensified complementary metal-oxide-semiconductor (ICMOS) for corona detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1-19.
- [10] SHCHESLAVSKIY V I, SHIRMANOVA M V, JELZOW A, et al. Multiparametric time-correlated single photon counting luminescence microscopy [J]. Biochemistry (Moscow), 2019, 84(Suppl 1): 51-68.
- [11] HADFIELD R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. Nature Photonics, 2009, 3(12): 696-705.
- [12] TERANISHI N. Toward photon counting image sensors[C]. Imaging Systems and Applications: Optica Publishing Group, 2011: IMA1.
- [13] HIRVONEN L M, JIGGINS S, SERGENT N, et al. Photon counting imaging with an electron-bombarded CCD: Towards a parallel-processing photoelectronic timeto-amplitude converter [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(12): 123102.
- [14] ROBBINS M S, HADWEN B J. The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50 (5): 1227-1232.
- [15] TISA S, TOSI A, ZAPPA F. Fully-integrated CMOS single photon counter [J]. Optics Express, 2007, 15(6): 2873-2887.
- [16] TISA S, GUERRIERI F, ZAPPA F. Variable-load

quenching circuit for single-photon avalanche diodes[J]. Optics Express, 2008, 16(3): 2232-2244.

- [17] HOLST G C, LOMHEIM T S. SPIE press monograph[M]. SPIE, Bellingham, Wash, 2007.
- [18] CASTRO A I G, DIEZ L, YAÑEZ J, et al. The detector for the far ultraviolet channel of the imaging instrument (FCU) on board the Spectrum-UV (WSO-UV) space telescope [C]. Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray: SPIE, 2020: 1-2.
- [19] QIAN Y SH,ZHOU X Y,WU Y J, et al. The ultraviolet detection component based on Te-Cs image intensifier[C]. Advanced Photon Counting Techniques Xi: SPIE, 2017: 58-65.
- [20] 刘莉,钱雪飞,刘珊,等.改进高帽变换的红外目标增 强和提取算法[J].激光与红外,2020,50(7): 882-888.

LIU L, QIAN X F, LIU SH, et al. Improved high-cap transform algorithm for infrared target enhancement and extraction [J]. Laser and Infrared, 2020, 50 (7): 882-888.

- [21] ZACK G W, ROGERS W E, LATT S A. Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency[J]. Journal of Histochemistry & Cytochemistry, 1977, 25(7): 741-753.
- [22] 曲立国,陈国豪,胡俊,等. 单次扫描连通域分析算法 研究综述[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1521-1536.
 QULG, CHENGH, HUJ, et al. A review of singlesweep connected domain analysis algorithms [J]. Acta Electronics Sinica, 2022, 50(6): 1521-1536.
- [23] 杨昊元.基于图像统计特征的可见光图像复原方法研究[D].西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所),2021.

YANG H Y. Visual image restoration methods based on image statistical features [D]. Xi' an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2021.

[24] 戚康男. 统计光学导论[M]. 天津:南开大学出版社, 1987. Qi K N. Introduction to statistical optics [M]. Tianjin: Nankai University Press, 1987.

[25] 孙英恺. 基于 EMCCD 的光子计数成像方法及实验研 究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.

SUN Y K. Photon counting imaging method and experimental research based on EMCCD [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

作者简介



周一乐,2018年于东南大学获得学士学位,现为北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉与图像处理方向。

E-mail: zhouyile000@ qq. com

Chou Yile received his B. Sc. degree from Southeast University in 2018. He is currently a master student at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include machine vision and image processing.



娄小平,1998年于北京航空航天大学获 得硕士学位,现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为视觉与光电检测技术。 E-mail: louxiaoping@bistu.edu.cn

Lou Xiaoping received her M. Sc. degree from Beihang University in 1998. Her is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include vision and photoelectric detection technology.



牟涛涛(通信作者),2017年于北京理 工大学获得博士学位,现为北京信息科技大 学副教授,主要研究方向为光谱分析。 E-mail:mfimtt@163.com

Mu Taotao (Corresponding author),

received his Ph. D. from Beijing Institute of Technology in 2017, and is currently an associate professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research direction is spectral analysis.